

PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES
PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL
RÍO CAUCA

LUIS CARLOS ROSERO QUIMBAYO
MILTON CÉSAR TORRES GÓMEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2015

PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES
PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL
RÍO CAUCA

LUIS CARLOS ROSERO QUIMBAYO
MILTON CÉSAR TORRES GÓMEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito
Para optar al título de Ingeniero Sanitario y Ambiental
Directores: M.Sc. Carlos Alberto Ramírez Callejas

UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por habernos acompañado y guiado a lo largo de la carrera, por la fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarnos una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

También agradecemos a nuestros padres por brindarnos apoyo en todo momento, por los valores inculcados y por habernos dado la oportunidad de tener una excelente educación.

Le damos gracias a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al profesor Carlos Ramírez Callejas, director de este proyecto de grado, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua, pero sobre todo por la motivación y el apoyo.

Especial reconocimiento a los compañeros Christian Andrés Goyez y Deiby Castrillón por su interés mostrado en este trabajo, además de su constante apoyo y sugerencias.

Quisiéramos hacer extensiva la gratitud a los compañeros de carrera, por su amistad, colaboración y compañerismo.

Finalmente agradecemos a la Universidad del Valle por habernos dado la oportunidad de escalar un peldaño más en el campo del conocimiento, como también por habernos provisto de excelentes maestros, quienes brindaron su conocimiento y confianza en el transcurso de nuestra carrera.

CONTENIDO

	PG
RESUMEN.....	16
0. INTRODUCCIÓN	17
1. PROBLEMA	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.2 ANTECEDENTES.....	22
1.2.1 USOS DEL RECURSO HÍDRICO EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA	23
1.2.1.1 Incremento sensible de los caudales en temporada de verano.	24
1.2.1.2 Reducción de caudales en temporada de invierno	25
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	27
2 JUSTIFICACIÓN	29
3 OBJETIVOS	31
3.1 OBJETIVO GENERAL	31
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
4 MARCO REFERENCIAL	32
4.1 MARCO TEÓRICO.....	32
4.1.1 Inundaciones	32
4.1.1.1 Inundación de tipo aluvial (inundación lenta).....	32
4.1.1.2 Creciente o Inundación de tipo torrencial (inundación súbita)	32
4.1.1.3 Inundaciones urbanas	33
4.1.2 Efectos de las inundaciones	33
4.1.3 Llanuras de Inundación	34
4.1.4 Medidas preventivas y de mitigación para la gestión de las inundaciones	34
4.1.5 Modelo Hidráulico	39
4.1.5.1 Cálculo de perfiles de agua superficial	40
4.1.5.3 Limitaciones del programa.....	42
4.2 MARCO CONCEPTUAL.....	42
5 METODOLOGÍA	45
5.1 Recopilación y análisis de información disponible.....	45
5.2 Caracterización física, hidráulica, hidrológica y geomorfológica	45
5.3 Construcción del modelo Hidrodinámico del Sistema Río Cauca – Tributarios - Humedales	45
5.4 Planteamiento, modelación y evaluación de diferentes alternativas estructurales.....	46
5.5 Determinación de mapas de inundación	46

6	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO	47
6.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS TRIBUTARIOS DEL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO	51
6.1.1	Río Ovejas.....	51
6.1.2	Río Timba	51
6.1.3	Río Palo.....	51
6.1.4	Río Jamundí	51
6.1.5	Río Amaime	52
6.1.6	Río Guadalajara.....	52
6.1.7	Río Riofrío	52
6.1.8	Río Tuluá.....	52
6.1.9	Río Bugalagrande.....	53
6.1.10	Río La Vieja	53
6.1.11	Río Risaralda.....	53
6.2	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO	53
6.2.1	Relaciones en la geometría hidráulica.....	54
6.2.2	Caudal a banca llena.....	56
6.2.3	Rugosidad.....	57
6.2.4	Sinuosidad	57
6.2.5	Pendiente hidráulica	58
6.3	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DEL RIO CAUCA	58
6.3.1	Controles litológicos	62
6.3.2	Erosión en el cauce principal	63
6.4	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL RÍO CAUCA.....	64
6.4.1	Curvas de duración de caudales medios diarios.....	64
6.4.2	Curvas de duración de niveles medios diarios	65
7	IMPLEMENTACION DEL MODELO.....	66
7.1	TRAMO A MODELAR.....	66
7.2	PERIODO A MODELAR.....	66
7.3	MODELO HIDRODINÁMICO.....	66
7.3.1	Esquematización de la red de modelación	66
7.3.2	Secciones transversales del río cauca.....	66
7.3.3	Ríos tributarios	67
7.4	FRONTERAS DEL MODELO	68

7.4.1	Frontera Superior	68
7.4.2	Fronteras internas	68
7.4.3	Frontera Inferior	69
7.5	MALLA COMPUTACIONAL	69
7.6	CALIBRACIÓN DEL MODELO	70
7.7	VERIFICACIÓN DEL MODELO.....	78
7.8	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	79
7.8.1	Análisis de la influencia del espaciamiento máximo entre secciones.....	79
7.8.2	Análisis de la influencia del intervalo de tiempo computacional	80
7.8.3	Análisis de la influencia de la rugosidad del cauce.....	80
8	PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES MEDIDAS ESTRUCTURALES PARA LA GESTIÓN DE INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA	81
8.1	RUGOSIDAD	81
8.2	HIDRÓGRAFAS DE CAUDALES.....	81
8.3	ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES CONSIDERADAS PARA EL MODELO.....	84
8.4	RELOCALIZACIÓN DE DIQUES	85
9	MAPA DE INUNDACION EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA.....	94
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
10.1	CONCLUSIONES	97
10.2	RECOMENDACIONES	101
10	BIBLIOGRAFÍA	103
11	ANEXOS	108
11.1	ANEXO A Verificación del modelo hidrodinámico en las estaciones hidrométricas del río Cauca	108
11.2	ANEXO B. Análisis de Sensibilidad: influencia del espaciamiento máximo entre secciones Δx_{max} en las estaciones hidrométricas del río cauca	115
11.3	ANEXO C. Análisis de Sensibilidad: influencia del intervalo de tiempo Δt entre secciones Δx_{max} en las estaciones hidrométricas del río Cauca	122
11.4	ANEXO D. Análisis de Sensibilidad: influencia de la rugosidad de manning entre secciones Δx_{max} en las estaciones hidrométricas del río Cauca	129

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE MEDIDAS ESTRUCTURALES	35
TABLA 2. RUGOSIDAD HIDRÁULICA DE MANNING EN CAUCES SEGÚN CHOW Y COWAN ...	41
TABLA 3. ZONAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CAUCA	47
TABLA 4. COEFICIENTES Y EXPONENTES DE LAS RELACIONES DE LEOPOLD Y MADDOCK PARA EL RÍO CAUCA	55
TABLA 5. CAUDALES Y ANCHO A BANCA LLENA EN EL RÍO CAUCA	56
TABLA 6. COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE CHEZY SEGÚN VAN RIJIN PARA LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN EL RÍO CAUCA	57
TABLA 7. DEPÓSITOS ALUVIALES Y COLUVIALES EN EL RÍO CAUCA	61
TABLA 8. RESUMEN DE LOS CAUDALES CARACTERÍSTICOS DEL RÍO CAUCA EN EL TRAMO DE ESTUDIO.....	64
TABLA 9. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES Y NIVELES DIARIOS. PERIODOS PRE Y POST SALVAJINA.....	65
TABLA 10. LOCALIZACIÓN DE LOS RÍOS TRIBUTARIOS CONSIDERADOS EN EL MODELO	67
TABLA 11. FACTORES DE RUGOSIDAD DE MANNING DEL RÍO CAUCA DEFINIDAS DURANTE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO	70
TABLA 12. CAUDALES MÁXIMOS ESTIMADOS PARA LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS DEL RÍO CAUCA PARA UNA CRECIENTE CON UN PERIODO DE RETORNO DE 30 AÑOS	82
TABLA 13. CAUDALES MÁXIMOS ESTIMADOS EN LAS FRONTERAS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 30 AÑOS.	83
TABLA 14. NIVELES DE AGUA MÁXIMOS EN EL RÍO CAUCA SIMULADOS PARA DIFERENTES LOCALIZACIONES DE LOS DIQUES MARGINALES DE PROTECCIÓN PERIODO DE RETORNO: 30 AÑOS	87
TABLA 15. NIVELES DE AGUA MÁXIMOS EN EL RÍO CAUCA SIMULADOS PARA DIFERENTES LOCALIZACIONES DE LOS DIQUES MARGINALES DE PROTECCIÓN PERIODO DE RETORNO: 30 AÑOS	88

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. CUENCA DE DRENAJE DEL VALLE DEL RÍO CAUCA. (TOMADA DE: INFORME DE CARACTERIZACIÓN DEL RÍO CAUCA TRAMO SALVAJINA – LA VIRGINIA, PROYECTO PMC – VOLUMEN VIII, 2001)	18
ILUSTRACIÓN 2. ANILLOS DE SEGURIDAD CONTRA INUNDACIONES EN EL RÍO CAUCA FUENTE: (SANDOVAL, 2012).....	26
ILUSTRACIÓN 3. LLANURAS DE INUNDACIÓN. FUENTE (ZARAGOZA, SF)	34
ILUSTRACIÓN 4. ALMACENAMIENTO DE VOLÚMENES DE CRECIENTE POR MEDIO DE PRESAS	37
ILUSTRACIÓN 5. MAPAS DE INUNDACIÓN Y AMENAZA DE INUNDACIÓN EN EL SECTOR DE LA LAGUNA DE SONSO EN EL VALLE DEL CAUCA	39
ILUSTRACIÓN 6. PERFIL LONGITUDINAL DE LA CUENCA DEL RÍO CAUCA	48
ILUSTRACIÓN 6. RED GEODÉSICA RÍO CAUCA.	50
ILUSTRACIÓN 8. MEANDROS TÍPICOS EN EL VALLE DEL RÍO CAUCA	59
ILUSTRACIÓN 9. CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES DIARIOS EN LAS ESTACIONES MÁS CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO	65

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. SERIE DE CAUDALES FRONTERA SUPERIOR DEL MODELO ESTACIÓN: LA Balsa PERIODO JULIO A DICIEMBRE DEL 1999	68
FIGURA 2. CURVA DE CALIBRACIÓN NIVEL - CAUDAL INTRODUCIDA EN LA FRONTERA INFERIOR MODELO ESTACIÓN: LA VIRGINIA-TOPOGRAFÍA 2012-PERIODO: JUNIO A DICIEMBRE 1999	69
FIGURA 3. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: LA BOLSA PERIODO JULIO - SEPTIEMBRE 1999. CAUDAL CALCULADO VS CAUDAL MEDIDO	71
FIGURA 4. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: LA BOLSA PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. NIVEL CALCULADO VS NIVEL MEDIDO	72
FIGURA 5. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: HORMIGUERO PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. CAUDAL CALCULADO VS CAUDAL MEDIDO	72
FIGURA 6. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: HORMIGUERO PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. NIVEL CALCULADO VS NIVEL MEDIDO	73
FIGURA 7. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: JUANCHITO PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. CAUDAL CALCULADO VS CAUDAL MEDIDO.....	73
FIGURA 8. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: JUANCHITO PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. NIVEL CALCULADO VS NIVEL MEDIDO	74
FIGURA 9. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: MEDIACANOA PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. CAUDAL CALCULADO VS CAUDAL MEDIDO.....	74
FIGURA 10. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: MEDIACANOA PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. NIVEL CALCULADO VS NIVEL MEDIDO.....	75
FIGURA 11. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: GUAYABAL PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. CAUDAL CALCULADO VS CAUDAL MEDIDO.....	75
FIGURA 12. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: GUAYABAL PERIODO JULIO– SEPTIEMBRE 1999. NIVEL CALCULADO VS NIVEL MEDIDO	76
FIGURA 13. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: LA VICTORIA PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. CAUDAL CALCULADO VS CAUDAL MEDIDO.....	76
FIGURA 14. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: LA VICTORIA PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. NIVEL CALCULADO VS NIVEL MEDIDO	77

FIGURA 15. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: ANACARO PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. CAUDAL CALCULADO VS CAUDAL MEDIDO.....	77
FIGURA 16. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO ESTACIÓN: ANACARO PERIODO JULIO – SEPTIEMBRE 1999. NIVEL CALCULADO VS NIVEL MEDIDO	78
FIGURA 17. NIVELES DE AGUA EN EL RÍO CAUCA SIN ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES DE PROTECCIÓN PARA UN TR=30 AÑOS TRAMO: LA Balsa – LA VIRGINIA	84
FIGURA 18. DIQUES DISTANCIADOS A 60 METROS, ESTACIÓN LA Balsa	86
FIGURA 19. DIQUES DISTANCIADOS A 150 METROS, ESTACIÓN LA Balsa	86
FIGURA 20. DIQUES DISTANCIADOS A 200 METROS, ESTACIÓN LA Balsa	87
FIGURA 21. DISMINUCIÓN DE LOS NIVELES DE AGUA MÁXIMOS EN EL RÍO CAUCA COMPARANDO DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA LA GESTIÓN DE INUNDACIONES.....	89
FIGURA 22. DISMINUCIÓN DE LOS NIVELES DE AGUA MÁXIMOS EN EL RÍO CAUCA CON ESTRUCTURAS (DIQUES DISTANCIADOS) Y SIN ESTRUCTURAS.	91
FIGURA 23. LAGUNA DE LAMINACIÓN (A) FUERA DE LÍNEA Y (B) EN LÍNEA.....	92
FIGURA 24. HIDRÓGRAFA DE REDUCCIÓN DEL PICO DE DESCARGA.....	93
FIGURA 25. MAPA DE INUNDACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 30 AÑOS SIN ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES.....	96

LISTA DE ANEXOS

Figura A-1. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Octubre – Diciembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	108
Figura A-2. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido.....	108
Figura A- 3. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: El Hormiguero Periodo Octubre – Diciembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido	109
Figura A- 4. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: El Hormiguero Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculado vs Caudales medidos	109
Figura A- 5. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos	110
Figura A-6. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales medidos	110
Figura A- 7. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos	111
Figura A- 8. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales medidos	111
Figura A-9. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales medidos	112
Figura A-10. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales medidos	112
Figura A- 11. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos	113
Figura A- 12. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculado vs Caudales medidos	113
Figura A- 13. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos	114
Figura A- 14. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculado vs Caudales medidos	114

FIGURA B- 1. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: LA BOLSA-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS).....	115
FIGURA B- 2. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: LA BOLSA-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS).....	115
FIGURA B- 3. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: HORMIGUERO-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS).....	116
FIGURA B- 4. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: HORMIGUERO-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS).....	116
FIGURA B- 5. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: JUANCHITO-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS)...	117
FIGURA B- 6. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: JUANCHITO-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS)	117
FIGURA B- 7. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: MEDIACANOA-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS)	118
FIGURA B- 8. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: MEDIACANOA-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS)	118
FIGURA B- 9. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: GÜAYABAL-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS) ...	119
FIGURA B- 10. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: GÜAYABAL-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS) ...	119
FIGURA B- 11. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: LA VICTORIA-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS).	120
FIGURA B- 12. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: LA VICTORIA-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS)	120
FIGURA B- 13. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: ANACARO-PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS).....	121
FIGURA B- 14. INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO MÁXIMO (Δx) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: ANACARO -PERODO: JULIO –DICIEMBRE 1999 ($\Delta T= 2$ MINUTOS).....	121

FIGURA C- 1. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: LA BOLSA -PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	122
FIGURA C- 2. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: LA BOLSA-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	122
FIGURA C- 3. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: HORMIGUERO-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	123
FIGURA C- 4. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: HORMIGUERO-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	123
FIGURA C- 5. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: JUANCHITO-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	124
FIGURA C- 6. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: JUANCHITO-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	124
FIGURA C- 7. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: MEDIACANOA-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	125
FIGURA C- 8. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: MEDIACANOA-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	125
FIGURA C- 9. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: GÜAYABAL-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	126
FIGURA C- 10. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: GÜAYABAL-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	126
FIGURA C- 11. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: LA VICTORIA-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	127
FIGURA C- 12. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: LA VICTORIA-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	127
FIGURA C- 19. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: ANACARO-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	128
FIGURA C- 21. INFLUENCIA DEL INTERVALO DE TIEMPO (ΔT) EN LOS NIVELES ESTACIÓN: ANACARO-PERIODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	128

FIGURA D- 1. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: LA BOLSA-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	129
FIGURA D- 2. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS NIVELES ESTACIÓN: LA BOLSA-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	129
FIGURA D- 3. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: HORMIGUERO-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	130
FIGURA D- 4. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS NIVELES ESTACIÓN: HORMIGUERO-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	130
FIGURA D- 5. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: JUANCHITO-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	131
FIGURA D- 6. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS NIVELES ESTACIÓN: JUANCHITO-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	131
FIGURA D- 7. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: MEDIACANOA-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	132
FIGURA D- 8. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS NIVELES ESTACIÓN: MEDIACANOA-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	132
FIGURA D- 9. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: GÜAYABAL-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	133
FIGURA D- 10. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS NIVELES ESTACIÓN: GÜAYABAL-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	133
FIGURA D- 11. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: LA VICTORIA-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	134
FIGURA D- 12. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS NIVELES ESTACIÓN: LA VICTORIA-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	134
FIGURA D- 13. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS CAUDALES ESTACIÓN: ANACARO-PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$).....	135
FIGURA D- 14. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN LOS NIVELES ESTACIÓN: ANACARO- PERODO: JULIO-DICIEMBRE 1999 ($\Delta x_{MAX}=200M$)	135

RESUMEN

Las inundaciones en el departamento del Valle del Cauca, producidas por el desbordamiento del río Cauca durante los periodos invernales, causan graves daños y enormes pérdidas a la economía de la región. Para mitigar los efectos de las inundaciones, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca formuló, varias décadas atrás, el proyecto de Regulación del río Cauca, el cual se compone de la construcción de la represa de Salvajina, al norte del departamento del Cauca, y diques marginales a lo largo del río Cauca y en los tramos finales de sus principales tributarios. No obstante, muchos de los diques proyectados se construyeron muy próximos al cauce del río Cauca, generando incrementos apreciables en los niveles de agua del río durante las crecientes. Estos niveles superiores generan mayores presiones sobre los diques aumentando la probabilidad de falla de los mismos. De hecho, algunas de las inundaciones ocurridas durante la pasada ola invernal 2010-2011 se debieron a la rotura de diques.

Con el propósito de contribuir a una mejor gestión del riesgo por inundaciones en el valle alto del río Cauca, en el presente estudio se plantearon y evaluaron mediante la modelación matemática, diferentes alternativas estructurales de protección contra las inundaciones. Las alternativas planteadas y simuladas consistieron en ubicar los diques a diferentes distancias del cauce principal del río Cauca, buscando con ello reducir los niveles de agua en el río Cauca y, así, disminuir la presión sobre los diques. Con estas medidas se pretende, al mismo tiempo, devolverle al río parte de su planicie aluvial, espacio de gran importancia para el ecosistema fluvial y que ha sido altamente intervenida en los últimos años.

En desarrollo del estudio inicialmente se realizó la caracterización hidrológica, hidráulica, morfológica y sedimentológica del río Cauca y sus principales ríos afluentes. Posteriormente se implementó el modelo matemático HEC-RAS 4.1 para analizar y comprender mejor el comportamiento hidrodinámico del río Cauca. Una vez calibrado el modelo, se plantearon y modelaron tres alternativas estructurales, consistentes en localizar los diques marginales a 60 m, 150, y 200m de la orilla del río Cauca. Los resultados obtenidos muestran la reducción progresiva en los niveles de agua a lo largo de todo el tramo de estudio (La Balsa-La Virginia) al distanciar cada vez más los diques del cauce del río.

Por último, con el fin de estimar la extensión de las áreas que se inundarían, en el caso de ocurrir una creciente con un periodo de retorno de 30 años y considerando que no existiesen diques marginales en el río Cauca, se realizó una simulación sin incluir en el modelo ninguna medida estructural de protección; para llevar a cabo la simulación se utilizó la herramienta HEC-GEORAS.

Palabra Clave: modelos hidráulicos, mapa de inundación, medidas o alternativas de control

0. INTRODUCCIÓN

Los ríos siempre han representado para el ser humano un recurso vital para su existencia; muchas poblaciones, para aprovechar sus ventajas, se han asentado en la planicie de inundación, llegando en muchos casos hasta ocupar las propias orillas de los cauces, construyendo viviendas y otros tipos de infraestructura. Esto ha conllevado a la afectación de estos espacios, que son los que permiten producir un amortiguamiento natural frente a las crecientes periódicas; además de garantizar la fertilidad de los suelos; la restitución de los humedales y la recarga de los acuíferos; como también subsistencia de muchas poblaciones que viven de la agricultura y la pesca. Estas construcciones se han convertido para el Valle del Cauca en un factor que preocupa mucho a las autoridades, porque las poblaciones se hacen vulnerables a los eventuales efectos adversos de las inundaciones. (OMM, 2006).

Los ríos como ecosistemas integrales cumplen múltiples funciones, tales como servir de hábitat de numerosas especies animales y vegetales, abastecer y almacenar agua, mitigar las inundaciones, permitir la recarga y descarga de acuíferos, retener nutrientes y sedimentos, posibilitar el aporte de recursos hidrobiológicos, servir como refugio de especies migratorias. Por otro lado son utilizados por el hombre para la generación de energía, abastecimiento para el consumo humano, agrícola e industrial, drenaje, transporte comercial, turístico y recreacional.

Su constante intercambio de masa y energía hace de los ríos un sistema abierto, donde sus variables son los flujos de entrada y salida de agua, el aporte de nutrientes, sustancias tóxicas, precipitación, viento, radiación solar y temperatura, por lo cual estos ecosistemas además de ser sistemas abiertos, son sistemas dinámicos y complejos, donde su función radica principalmente, en permitir el flujo de los nutrientes o de los ciclos biogeoquímicos (IDEAM, sf).

El río Cauca es una de las arterias fluviales más importantes de Colombia, cruza el País de sur a norte en casi toda su extensión, desde el macizo Colombiano hasta su confluencia en el río Magdalena (Brazo de Loba), de él se benefician aproximadamente 183 municipios localizados en los departamentos que recorre, como son, Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar y en donde habitan aproximadamente diecinueve millones de personas que representan cerca del 41% del total de la población colombiana. (CVC- Universidad del Valle, 2001). Dentro del contexto nacional el río Cauca es un elemento estratégico por sus excelentes condiciones geográficas, topográficas y climáticas, (Ilustración 1).

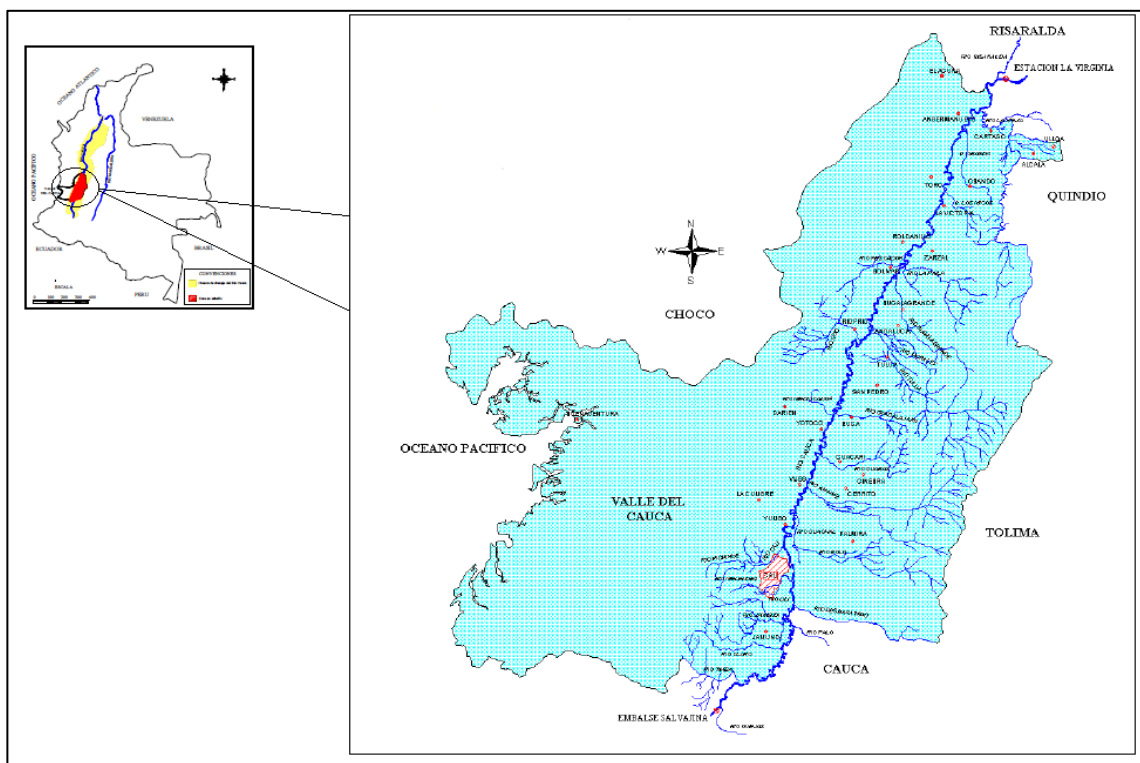


Ilustración 1. Cuenca de drenaje del valle del río Cauca. (Tomada de: Informe de Caracterización del río Cauca tramo Salvajina – La Virginia, Proyecto PMC – Volumen VIII, 2001)

Las intervenciones que se realicen deben estar encaminadas a lograr una convivencia armónica con los sistemas hídricos, pero en ningún caso para tratar de controlarlos. Previo a cualquier intervención que se proponga se debe primero estudiar y comprender su comportamiento (hidrodinámico, geomorfológico, sedimentológico, etc.) y luego entender y analizar los posibles efectos de las diferentes alternativas. Ello permitirá seleccionar las intervenciones que generen los mayores beneficios y los menores efectos adversos que se puedan producir en el sistema fluvial y su entorno.

Para llevar a cabo estos estudios se recurre a los modelos hidráulicos (físicos, matemáticos o híbridos) antes de realizar una obra importante sobre un afluente, con el objetivo de conocer y estimar la respuesta bajo condiciones de régimen no permanente, además de la obtención de los flujos de agua, el transporte de sedimentos, los cambios morfológicos en los niveles del fondo y la calidad del agua del sistema fluvial. La construcción de modelos permite disminuir los costos de operación, además que ser flexibles a la hora de introducir cambios en sus variables.

La ola invernal ocurrida en Colombia en los años 2010 – 2011 causó enormes estragos en todo el país, representados en pérdidas de vidas humanas y

cuantiosas pérdidas económicas por afectaciones de extensas zonas agrícolas y ganaderas y daños a las infraestructuras físicas (carreteras, redes de servicios públicos), viviendas, etc. El departamento del Valle del Cauca no fue la excepción a este desastre debido a los graves problemas ocasionados por el desbordamiento del río Cauca y sus tributarios, inundando cerca de 40,000 ha.

El presente informe tiene por objeto plantear y evaluar hidráulicamente, mediante la modelación matemática, diferentes alternativas estructurales para lograr una mejor gestión del riesgo por inundaciones causadas por el desbordamiento del río Cauca en su valle alto.

En el primer capítulo de este informe se presenta el problema, los antecedentes y el estado del arte, donde se presenta una breve descripción de los diferentes estudios que se han realizado en el valle alto del río Cauca. Posteriormente, en los capítulos 2,3 y 4 se presenta la justificación al problema a resolver; los objetivos propuestos y el marco teórico que incluye conceptos básicos de hidráulica fluvial, descripción general de los diferentes tipos de medidas, extensivas e intensivas utilizadas en la actualidad para lograr una mejor gestión del riesgo por inundaciones, y los fundamentos teóricos del modelo unidimensional HEC-RAS 4.1.

En el capítulo 5 se presenta y describe la metodología adoptada para la realización del proyecto. Posteriormente, en el capítulo 6 se presenta la descripción y el análisis de las características físicas, hidráulicas, hidrológicas y geomorfológicas del río Cauca en su valle alto geográfico.

La revisión y el ajuste del modelo matemático (HEC-RAS 4.1) se presenta en la capítulo 7, donde se describe los parámetros utilizados para la calibración del modelo y la verificación del mismo con respecto a los niveles de agua arrojados por el programa con los medidos en la estaciones hidrométricas de la zona de estudio.

Posteriormente en el capítulo 8 se plantea y evalúan, mediante la aplicación del modelo matemático, diferentes medidas estructurales, con el fin de lograr un mejor manejo del riesgo por inundaciones en el Valle del Cauca.

Con el propósito de estimar la extensión de las áreas que se inundarían y afectarían si no existieran medidas estructurales de protección, se generó el mapa de inundaciones en la planicie del río Cauca en su valle alto, para la ocurrencia de una creciente en el río Cauca con un periodo de retorno de 30 años. En el capítulo 8 se presenta el mapa de inundación obtenido, incluyendo la descripción del pro proceso seguido para generar dicho mapa.

Por último, en el Capítulo 10 se presentan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

1. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las inundaciones ocasionadas por el desbordamiento de los ríos son fenómenos naturales que ocurren con cierta frecuencia en todo el planeta. Cada año durante los periodos de lluvias intensas se presentan muchos estragos a nivel mundial, dejando pérdidas económicas, escasez de alimento, de energía, agua y, peor aún, pérdidas de vidas humanas (Tucci, 2006; Ayala et al; 2011).

Además las inundaciones es considerada como el evento natural que mayores estragos causan a nivel mundial , por lo que se ha convertido en un problema en aumento que preocupa al gobierno y a la población en general, e implica, además, un reto en la reducción de su recurrencia, severidad, impacto y adaptación (Suárez, 2008).

Frente a esta situación, los países latinoamericanos enfrentan costos económicos (34 mil millones de dólares durante el periodo 2000 – 2009) y sociales potencialmente paralizantes en caso de la ocurrencia de desastres naturales por lo que los gobiernos deben hacer más para reducir los riesgos y preparar sus finanzas con el fin de responder a eventuales catástrofes (BID, 2010); en este sentido, se presenta un mayor uso del presupuesto hacia la asistencia humanitaria y existiendo la proyección de que estos sucesos seguirán ocurriendo, es necesario que la asignación del presupuesto se reparta con una mayor prioridad hacia la gestión del riesgo. Aunque los países latinoamericanos han logrado mejoras durante las últimas dos décadas, aún muestran bajos niveles de efectividad en la gestión de riesgo de desastres (BID, 2005).

Según un informe presentado por Omar Darío Cardona en la Conferencia Mundial sobre Reducción de Desastres, celebrada en Kobe, Japón, en enero de 2005, *“Colombia evidencia resultados sólo “apreciables” en la capacidad de identificar y reducir los riesgos de desastres naturales, de responder ante estos y recuperarse de sus efectos, obteniendo un nivel de efectividad probable en la gestión del riesgo de desastres menor al 60%”* (BID, 2005).

Aunque Colombia es uno de los países latinoamericanos que ha presentado menores niveles de vulnerabilidad ante desastres naturales en las últimas dos décadas (BID, 2005), es evidente que la fragilidad socioeconómica que envuelve al país aumenta el riesgo de desastre por inundaciones, ejemplo de ello se encuentra los estragos ocasionados por las inundaciones que se presentaron en el 2010 - 2011, dejando 1,642,109 hectáreas (ha) afectadas en 615 municipios de 28 departamentos (OPS, 2010; IGAC, 2011; Semana, 2011), según estudios meteorológicos del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

Los daños causados por las inundaciones se expresan principalmente en una reducción de los bienes, con la destrucción de las cosechas en pie, edificaciones, infraestructura y maquinaria, además de las pérdidas de vidas humanas. En 2011 se registraron pérdidas superiores a US \$4,870 millones en todo el territorio colombiano, evidenciando la necesidad de mejorar la gestión de los recursos hídricos (Cruz, 2012).

Los departamentos que más han sido afectados por el fenómeno de las inundaciones son el Valle del Cauca con más de 736 eventos registrados; Antioquia con 551; Bolívar con 472; Córdoba con 425; y, Magdalena con un total de 404 eventos registrados. Con las cifras anteriores se puede destacar el grado de afectación en cuanto al número de inundaciones en el Valle del Cauca y Antioquia, donde las zonas más impactadas han sido las áreas urbanas.

El departamento Valle del Cauca ha evidenciado muchos inconvenientes a causa de las inundaciones, que se incrementa cada vez más, por la alteración del régimen hidrológico, la mala planificación y gestión de las obras hidráulicas; que está dado por soluciones individuales que no parten de un análisis integral de los procesos en las cuencas; falta de gobernabilidad por parte de todas las instituciones; y el no cumplimiento o ausencia de normatividad (Sandoval, 2011).

Entre los años del 2010 y 2011, los municipios en el Valle del Cauca sufrieron graves consecuencias por la emergencia de la ola invernal, 41 de los cuales registraron urgencias manifiestas, 100,721 personas se afectaron de forma directa y 1,2 millones de personas de forma indirecta. La ruptura de estructuras de protección de los ríos, como los jarillones y diques afectó a 900,000 personas ubicadas en zonas del río Cauca, Cali y sus tributarios; además de las zonas de laderas, donde se registraron 200,000 afectadas.(Cruz, 2012).

El problema de los daños y las pérdidas ocasionadas por las inundaciones se debe a la ocupación indebida del territorio y a la falta de gobernabilidad. Por una parte, las instituciones no actúan oportunamente y de manera eficaz y hay un conocimiento insuficiente sobre el territorio y las amenazas debido a los diferentes fenómenos naturales.

Por otro lado se ha ocupado una parte importante de la planicie y la franja forestal protectora de los ríos para el desarrollo de diferentes actividades productivas, y las obras de protección se sitúan muy próximas al cauce del río. Además muchas veces se diseñan y construyen sin mucho rigor técnico por lo tanto es necesario devolverle al río alguna parte del espacio que se le ha quitado; para ello se propone el distanciamiento de los diques que ayudarían en gran parte a devolverle al río la planicie aluvial que es de gran importancia para el ecosistema fluvial.

1.2 ANTECEDENTES

En los años cuarenta la región del Valle del Cauca era un territorio poco promisorio para la inversión nacional e internacional, debido a la frecuencia de las inundaciones del río Cauca, además de sus tributarios, que amenazaban los cultivos agrícolas y algunas zonas urbanas, sin dejar atrás los conflictos sociales de la época que terminaron en la migración de los pobladores rurales hacia las áreas urbanas, lo que causó su expansión desordenada, como es el caso de la ciudad de Cali.

Por estas dificultades, la región buscó prontas soluciones, para ello se creó la CVC en 1954, que trajo consigo beneficios para todo el Valle del Cauca, entre estos: la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica; regulación del río Cauca para evitar o mitigar las inundaciones; distribución y reglamentación de las aguas para uso agrícola, doméstico, industrial, pecuario y público; protección de las aguas contra la contaminación; adecuación, recuperación y mejoramiento de tierras y suelos; reglamentación, conservación y preservación de flora y fauna; y, mejoramiento de las comunicaciones, puertos y sistemas de transporte.

Otros proyectos ejecutados por la CVC, es el de Aguablanca realizado por OLAP en 1958 y terminado en 1961; una de sus principales obras fue la construcción del Jarillón, que tiene una longitud de 26 Km, este se sitúa en la orilla izquierda del río Cauca, iniciando desde un kilómetro y medio del paso de Navarro hasta la desembocadura del río Cali. Este sistema se construyó con el objetivo de controlar las inundaciones que se presentaban en la época; pero el crecimiento urbanístico desorganizado que se dio desde 1970 hacia las orillas de río Cauca, ha hecho que el sistema presente fallas, por lo que muchos de los asentamientos urbanos se han inundado por no tener una adecuada evacuación de aguas servidas y de lluvias.

Otro proyecto liderado por CVC es la construcción de la represa de Salvajina en 1985, con el apoyo del gobierno japonés. Se realizó con un fin multipropósito: generación de energía, control de inundaciones y alivio de la contaminación. Con ello se logró reducir el área afectada por el desbordamiento del río Cauca, pero sin embargo, algunos ríos tributarios siguieron generando inundaciones que trajeron consigo un sin número de consecuencias para la región, como la ocurrida en 1999.

Por los constantes problemas de las inundaciones que se han presentado a través del tiempo en el Valle del Cauca, se empezó desde 1972 a realizar estudios del sistema del río Cauca, mediante modelación matemática, con el propósito de adquirir conocimiento sobre los procesos hidrodinámicos, sedimentológicos, morfológicos y de calidad de la fuente hídrica.

Dentro de estos estudios se encuentran los proyectos liderados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Escuela de Ingeniería de

Recursos Naturales y del ambiente de la Universidad del Valle, como es el Proyecto de Modelación y Caracterización del Río Cauca (PMC), que tuvo como objetivo proveer a la CVC y a toda la región del Valle del Cauca de una herramienta de modelación matemática moderna, eficaz y confiable que permitiera el análisis y la toma de decisiones con respecto a intervenciones de diversa índole en el tramo Salvajina - La Virginia del río Cauca.

Desde la implementación de la primera modelación matemática del río Cauca en 1972, empezaron a surgir nuevos estudios, como son:

- Optimización del modelo hidrodinámico y generación de mapas de inundaciones del río cauca. PMC fase II.
- Optimización del modelo hidrodinámico y generación de mapas de inundaciones del río cauca. Tramo yumbo-toro, PMC fase III.
- Estudio de inundación en el río Quindío mediante modelación matemática. Sector bocatoma Armenia calle larga.
- Modelación hidrológica e hidráulica aplicada a estudios de inundabilidad en cauces naturales, caso de estudio: urbanización río Nima
- Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos de masa, inundaciones y avenidas torrenciales del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión.

Todos estos estudios tienen como principal objetivo la obtención de conocimiento que permita a las instituciones como la CVC y otras entidades, además de la misma región, tomar mejores decisiones en cuanto a planificación y ejecución de obras de control; como también un mejor aprovechamiento y restauración del recurso hídrico.

1.2.1 Usos del recurso hídrico en el valle alto del río cauca

El agua del río Cauca es utilizada principalmente para el abastecimiento humano y recreación, para la actividad agropecuaria, para la minería, para la navegación de bajo calado y como fuente receptora de los vertimientos generados de las distintas actividades económicas y domésticas.

El sector agrícola representa el porcentaje más alto de demanda hídrica en el valle alto del río Cauca, demandando un poco más de 75%, para lo cual gran parte se destina para el riego de la caña de azúcar, seguido por el sector industrial con el 14 % y para la generación de energía del 9% (MAVDT et al., 2009).

Los materiales que conforman el lecho del río Cauca, son arenas medias predominando un diámetro específico que les da la característica de uniformidad. Aproximadamente el río transporta 3.5 millones de toneladas de sedimentos en suspensión. Por eso otra actividad con gran importancia para el desarrollo de la región es la explotación de materiales de arrastre, que consiste en la extracción de materiales del fondo, arena y Proyecto de regulación grava, que son usados para

la construcción. Los métodos de extracción de materiales en el río Cauca son mediante extracción mecánica (La realiza un arenero con palas) y dragas tipo succión (bombas succionadoras por una tubería).

De esta manera se ha cambiado el cauce natural del río iniciando un proceso de erosión que trae como consecuencias el aumento de la profundidad del agua, el área hidráulica y disminuyendo la velocidad del flujo; alterando así la dinámica natural del río. La falta de sedimentos en el río conlleva a que se produzca erosión en las bancas y el lecho, debido a que el río trata de recuperar los sedimentos perdidos (CVC-Universidad del Valle, 2007) del río Cauca

Al norte del departamento del Cauca sobre el río Cauca se encuentra el embalse de Salvajina, que forma parte del proyecto de regulación del río Cauca junto con los diques, canales interceptores, estaciones de bombeo; además de los canales de drenaje por parte de los propietarios de los predios ribereños del río Cauca ubicados aguas abajo del embalse.

El embalse de Salvajina fue el primer embalse multipropósito creado en Colombia, con el inicio de operaciones del proyecto, el sistema natural del río Cauca fue modificado, por lo que para realizar un análisis de los caudales es importante considerar dos periodos, como son el antes y después de su entrada en operación, periodos que se denominan pre-salvajina (1940-1984) y post-Salvajina (1985-2003).

Puesto en marcha el embalse de Salvajina los flujos o caudales máximos y mínimos en el río Cauca cambiaron notoriamente debido al incremento de los caudales bajos durante el verano para la dilución de la carga contaminante vertida, como también en la disminución del caudal en invierno para el control de las excedencias. A continuación se presenta algunas funciones del embalse de Salvajina.

1.2.1.1 Incremento sensible de los caudales en temporada de verano.

El embalse de Salvajina en el río Cauca en su valle Alto, en la temporada de verano incrementa los caudales más bajos del río Cauca, garantizando así un caudal mínimo para la captación de agua para consumo humano en Juanchito; aumenta la capacidad de dilución de la carga contaminante en el río.

Los estudios demuestran que el periodo Post-Salvajina trajo aumentos mensuales de los caudales diarios mínimos, superando el caudal más bajo recomendado para el control de la contaminación por dilución a la altura de la estación de Juanchito (130 m³/s). De esta manera los caudales diarios mínimos garantizaron suficiente caudal para la captación de agua del acueducto de Cali (80 m³/s en Juanchito). A diferencia en el periodo de Pre-Salvajina donde el cumplimiento de estas restricciones en los meses más secos del año no se garantizaba, lo cual constituye un importante logro de la operación del embalse (Ramírez et al., 2010).

1.2.1.2 Reducción de caudales en temporada de invierno

Otro de los efectos del embalse de Salvajina en el río Cauca en su valle Alto fue reducir en invierno los caudales, lo que significó una disminución de la frecuencia de desbordamientos y de extensión de áreas inundadas.

Respecto a estudios (CVC-Universidad del Valle, 2007a) se puede observar la disminución significativa de los caudales máximos mensuales durante el periodo Post-Salvajina en invierno para los meses de (abril - junio y octubre - diciembre), donde en el mes de noviembre se encuentra la mayor diferencia entre los promedios de los caudales máximos mensuales multianuales, los cuales se redujeron de 621 a 495 m³/s en Juanchito y de 654 a 539 m³/s en Mediacanoa.

La regulación de los desbordamientos del río Cauca a causa de la disminución de los Caudales por parte del embalse en época de invierno conlleva a que en el sistema se acumule o almacene agua; además de los sedimentos que han aumentado debido la deforestación que se presenta en la parte alta de la cuenca, por lo que en época de invierno se acrecienta el problema por la mayor carga de sedimentos producto del lavado del suelo que escurre hacia el cauce del río Cauca, esto conlleva a que se pierda volumen de funcionamiento del sistema.

Una de las consecuencias que trajo la represa de Salvajina fue la de disminuir el nivel de agua en los sistemas de humedales de aguas abajo, que también se presenta por el no desarrollo de las obras complementarias para la regulación del nivel de estos ecosistemas.

El proyecto de regulación del río Cauca consistió en la construcción de varias obras, una de ellas fue el embalse de Salvajina con 150 m de altura, la cual posee túneles de descarga y de carga, rebosadero; y un volumen de 866 m³; además de la represa también se planeó la creación de obras en la planicie, entre estas esta: la construcción de 715 km de diques marginales al río Cauca y tributarios, 626 km de canales interceptores y de drenaje; y de 27 estaciones de bombeo (Sandoval, 2012). En la Ilustración 2 se puede observar la proyección de los anillos de seguridad para el río Cauca.

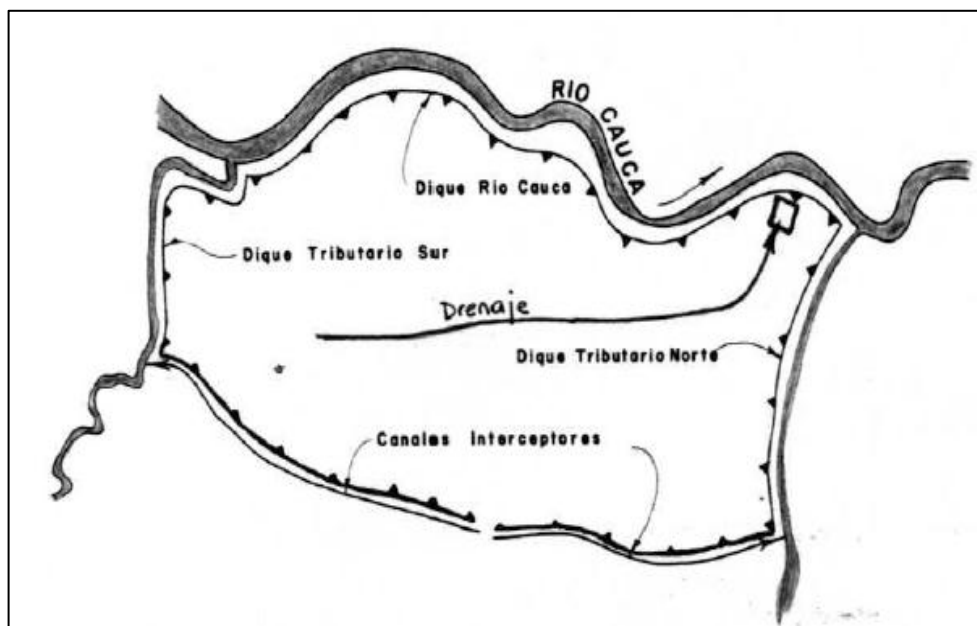


Ilustración 2. Anillos de seguridad contra inundaciones en el río Cauca
Fuente: (Sandoval, 2012)

Muchas de las obras en planicie han sido desarrolladas pero no en su totalidad ya que de los 715 km de diques marginales proyectados solo el 60% se han construido, de los 626 km de canales interceptores y de drenaje solo el 20%; y de las 27 estaciones de bombeo proyectadas solo 6 se han desarrollado (Sandoval, 2012). A causa de estas obras inconclusas, muchos de los sitios donde no se han construido las obras de la planicie se han presentado desbordamientos del río, como las presentadas en la ola invernal del 2010. Por esta razón la CVC siempre ha recomendado a los agricultores realizar la protección correspondiente a las obras en la planicie requeridas en el diseño inicial del Proyecto de Regulación del río Cauca (Ramírez et al., 2010).

Aunque la operación del embalse de Salvajina ha originado un gran cambio en la dinámica de los niveles del agua; como también en las profundidades, los gradientes, los caudales y demás parámetros; dichas tendencias de cambio no pueden atribuirse exclusivamente a la operación del embalse, puesto que existen otros factores naturales y antrópicos que también intervienen, como son la variabilidad y cambio climático, los procesos morfológicos del río, la construcción de diques marginales, la extracciones de materiales del lecho y los cambios en los usos del suelo de la cuenca.

1.3 ESTADO DEL ARTE

Las precipitaciones altas, el cambio climático, el fenómeno de la Niña, los asentamientos suburbanos de desarrollo incompleto, la deforestación, entre otros; han incrementado el nivel del riesgo de las inundaciones. Debido a esto desde décadas atrás se han planteado varias soluciones:

La creación de la represa de salvajina; que permite reducir los niveles y frecuencias con que ocurre el desbordamiento del río, regulando los niveles que se presentan por precipitaciones altos o bajas.

Para los ríos tributarios que se encuentran aguas abajo de la represa salvajina se han construido obras complementarias como diques, plantas de bombeo entre otras, pero solo se han ejecutado el 70% de estas obras, por lo que algunas zonas localizadas aguas abajo de Salvajina, todavía sufren el constante problema de las inundaciones.

La CVC en conjunto con la Universidad del Valle, han desarrollado estudios de modelación del río Cauca con el objetivo de comprender los procesos que se llevan a cabo (hidrodinámicos, sedimentológicos, morfológicos y de la calidad del agua) en el sistema hídrico, estimando el impacto que ocasiona la intervención antrópica sobre este medio natural.

Es así que para el año 1977 y 1985 se implementó un modelo morfológico, para evaluar los cambios que se presentarían en la morfología del río Cauca a causa de las construcciones de los sistemas de regulación. Se concluyó que en los 3 Km localizados inmediatamente aguas abajo del embalse de Salvajina los niveles del fondo experimentarían variaciones entre 0.5 m y 2.0 m en un período de 15 años posteriores a la entrada en operación del embalse (OSSO, 2005)

En 1997-2001 la CVC y la Universidad del Valle ejecuta la fase I del proyecto PMC, que tuvo como finalidad la caracterización y análisis de los aspectos técnicos del río Cauca y sus tributarios, mediante la implementación de un sistema integrado de modelación matemática, que se realizó en condiciones estacionales de invierno y verano en el tramo Salvajina – La Virginia. El resultado de este modelo permitió simular diversos escenarios, considerados representativos de las intervenciones que se pueden realizar en el río Cauca.

Dentro de los resultados de este proyecto, se recomienda optimizar la modelación desarrollada mediante la realización de estudios y programas de mediciones de campo, como son: la construcción de una red geodésica de alta precisión, la modelación de las planicies de inundación, un estudio de la composición granulométrica del material del lecho del río Cauca y sus afluentes y el levantamiento topobatiométrico de los principales ríos tributarios (OSSO, 2005).

Entre los años 2002-2005 se desarrolló la fase II del proyecto PMC. Este proyecto parte de los resultados obtenidos en la fase I, con el objetivo de optimizar las modelaciones hidrodinámica, sedimentológica, morfológica y de calidad del agua desarrolladas, alcanzando una aproximación más detallada de los procesos que se presentan en el río Cauca, además de la generación del modelo digital de las elevaciones del terreno del valle del río Cauca, que permitió tener un mejor acercamiento a las condiciones reales de la topografía de la zona de estudio.

Mediante el proyecto de PMC fase II se llegó a la conclusión, de fortalecer los estudios y actividades que se presenten por construcciones de obras de protección contra inundaciones que alteran la hidrodinámica del río Cauca, entre estos estudios esta (la modelación de los principales ríos tributarios, la estimación del caudal de intercambio río – acuífero y programas de mediciones hidrométricas, batimétricas, topográficas (levantamiento de diques y planicies aluviales) y del transporte de sedimentos). De esta manera se logra optimizar y actualizar los modelos.

2 JUSTIFICACIÓN

Las condiciones geomorfológicas, climatológicas e hidráulicas del valle alto del río Cauca favorecen la ocurrencia periódica de crecientes del río Cauca y sus tributarios. Las lluvias fuertes y prolongadas provocan el aumento de los caudales y los niveles de agua, causando el desbordamiento del cauce principal, generando la inundación de las bermas y la planicie aluvial, bien sea por rebose de los diques de protección o por la falla de los mismos. las planicies en el valle alto del río Cauca, que han sido intensamente explotados en actividades agrícolas y ganaderas, además de los asentamientos humanos, por lo cual ocasionan grandes daños y pérdidas económicas y en ocasiones de vidas humanas.

Si bien la legislación existente ha sido clara en la participación y competencia de los actores involucrados en esta problemática, hasta hora es muy poco el avance en el tema del conocimiento de las amenazas y riesgos en las cuales se encuentra expuesto el territorio; por lo tanto el impacto de las inundaciones es cada vez mayor, lo que evidencia la inadecuada gestión del riesgo por inundaciones (territorial, sectorial y privada), que se traduce, entre otros efectos, en una tendencia a la ocupación inadecuada del territorio, el crecimiento acelerado de asentamientos humanos de desarrollo incompleto y la ejecución de proyectos urbanísticos en áreas susceptibles a inundaciones.

En los últimos años, diferentes instituciones, como la CVC y la Universidad del Valle, han venido realizando estudios orientados a un mejor conocimiento del territorio y especialmente a la gestión del riesgo por inundaciones en el Valle del Cauca. Entre estos se tienen estudios de caracterización y modelación del río Cauca y sus tributarios, zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por diferentes fenómenos, como inundaciones, avenidas torrenciales y deslizamientos de tierras en algunos municipios del departamento.

Por otra parte, la CVC junto con la cooperación del gobierno de Holanda inició en el año 2011 un proyecto piloto en la zona hidrográfica del alto Cauca cuyo objetivo es la construcción de un modelo conceptual para la restauración del corredor de conservación y uso sostenible del sistema río Cauca en su valle alto, considerando escenarios de cambio climático. Dentro de este proyecto, la Universidad del Valle realizó la zonificación de amenazas por inundaciones del río Cauca en su valle alto y planteamiento, modelación y evaluación de opciones de protección. En este estudio se utilizó el modelo matemático comercial Mike11. En él se plantearon diferentes medidas estructurales, tales como diques marginales (localizados a 60 m, 90 m y 120 m del río), embalses de regulación en algunos tributarios, áreas de almacenamiento temporal e integración de los humedales a la dinámica del río Cauca.

En el presente estudio se plantearon y evaluaron, como medida estructural para la gestión de las inundaciones, diques marginales de protección, considerando diferentes distancias al cauce del río Cauca (60 m, 150 m y 200 m). Con estas

medidas estructurales se pretende lograr un mejor manejo de las crecientes en el río, permitiendo una mayor laminación de las mismas, reduciendo los caudales y los niveles en el río, y al mismo tiempo, devolverle al río parte de su espacio natural (planicie de inundación). Adicionalmente se construyó un modelo del río y su planicie sin considerar ninguna estructura de protección, lo cual permite estimar los incrementos que se generan en los niveles de agua en el río al ubicar los diques marginales de protección.

Para el desarrollo del estudio se implementó el modelo matemático HEC-RAS, un modelo de uso libre, lo cual permitirá disponer a futuro de un modelo del río Cauca que puede ser implementado y aplicado por diferentes instituciones y usuarios interesados en el tema de la gestión del riesgo por inundaciones y en la recuperación y conservación del río cauca.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Plantear y evaluar, mediante la modelación matemática, diferentes alternativas estructurales para la gestión del riesgo de inundaciones causadas por los desbordamientos del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización física, hidráulica, hidrológica y geomorfológica del río Cauca en su valle alto geográfico.
- Implementar un modelo matemático hidrodinámico del sistema río Cauca, incluyendo sus tributarios, planicies de inundaciones y humedales.
- Plantear, modelar y evaluar diferentes alternativas estructurales para el control de las inundaciones en el departamento del Valle del Cauca originados por el desbordamiento del río Cauca.
- Elaborar el mapa de inundaciones en el valle alto del río Cauca para una creciente con un periodo de retorno de 30 años.

4 MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Inundaciones

Los eventos naturales presentados a causa de las precipitaciones altas y continuas que superan la capacidad de transporte del cauce, además de la capacidad de absorción del suelo, que se presentan de manera aleatoria en función de los procesos climáticos se conoce como inundación (Tucci, 2007), que al superar los niveles de banca llena se produce la inundación de la llanura aluvial.

Muchos de los desastres causados por las inundaciones ha sido debido al crecimiento agrícola que ha retirado cobertura vegetal, lo que ha llevado a que la frecuencia de las inundaciones se incremente como consecuencia de la colmatación de los cauces de los ríos y la falta de interceptación de la lluvia.(Koolhaas, 2003).

Las inundaciones también pueden ser provocadas por situaciones de origen artificial como las roturas de tanques o cisternas captadoras de agua, la rotura de presas, dificultad en la canalización por bloqueo natural o artificial (Velis, et al., 1991).

El fenómeno natural de las inundaciones se puede dividir en varios tipos dependiendo del régimen de los cauces, entre estos esta:

4.1.1.1 Inundación de tipo aluvial (inundación lenta)

Se produce cuando hay lluvias de gran duración y se generan adentro de una gran cuenca, lo cual causa un aumento de los caudales en los grandes ríos que superan la capacidad máxima de almacenamiento; trayendo consigo el desbordamiento y la inundación de las áreas planas aledañas al cauce principal (Aparicio, 2003).

4.1.1.2 Creciente o Inundación de tipo torrencial (inundación súbita)

Producto de lluvias intensas que se presentan en ríos de montaña, los cuales poseen poca área en la cuenca, pero tienen fuertes pendientes. El aumento de los caudales se produce cuando la cuenca recibe la acción de las tormentas durante determinadas épocas del año, por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración. Este tipo de inundaciones son las causantes de los mayores impactos en la población. Las precipitaciones torrenciales que se acumulan peligrosamente en un lapso muy breve de tiempo, hacen que el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia sea más reducido (Aparicio, 2003).

4.1.1.3 Inundaciones urbanas

Esta clase de inundación se da por las deficiencias de las redes de drenaje, en ciudades con una topografía plana o cóncava y/o por el desbordamiento de los ríos y quebradas que atraviesan o bordean las poblaciones (IDEAM, 2004). La principal causa de las inundaciones urbanas es la impermeabilización de las superficies que producen una disminución del tiempo pico y del tiempo base del hidrograma, aumentando los caudales máximos en las tuberías de drenaje.

4.1.2 Efectos de las inundaciones

La energía que movilizan las inundaciones produce una transformación en el paisaje, son vitales en los ciclos de los ecosistemas fluviales y de ribera, además que favorecen la productividad de las llanuras de inundación, también pueden ocasionar daños sobre la infraestructura, los bienes y las personas.

Una de las principales consecuencias de las inundaciones es la modificación de los paisajes, tanto en el mismo cauce, como en las áreas potencialmente inundables (terrazas fluviales, abanicos aluviales, llanos de inundación, deltas, humedales, depresiones, endorreicas, depresiones kársticas). Las repercusiones a veces se dejan notar tras varias inundaciones sucesivas, con cierto tiempo de escala geológica (Mateu, 1990).

El efecto también se observa en los ecosistemas favoreciendo el crecimiento y muerte de muchas especies en las riberas, tras una inundación se renueva el ambiente fluvial y los hábitats, como parte natural del ciclo ecológico; además de que se incrementa la fertilidad del suelo, se limpian los cauces, se renuevan aguas estancadas y se recargan los acuíferos.

Otro efecto de las inundaciones se presentan en la infraestructura principalmente en zonas propensas a inundación, por lo que se incrementa el riesgo de daños parciales o totales sobre vías, sistemas de telecomunicaciones, viviendas, industrias, cultivos, puentes, defensas, presas, estaciones de aforo, bocatomas, redes de agua potable, tuberías, embalses, canales, acequias, etc.

No se puede dejar atrás la afectación de las inundaciones en las personas ya que produce paralización de actividades productivas con las respectivas pérdidas económicas directas e indirectas en sector privado y público, detrimento de la calidad de vida, ralentización del desarrollo económico y del bienestar, conflictos sobre la propiedad, migraciones y desplazamiento, efectos sobre la salud pública, propagación de epidemias y pérdidas de vidas humanas.

4.1.3 Llanuras de Inundación

El área o espacio que ocupa el río cuando ocurre una inundación por una crecida que desborda el cauce menor se le conoce como llanura de inundación. Estas zonas que pertenecen a los ríos se caracterizan por ser muy fértiles debido a los depósitos de sedimentos y nutrientes que quedan después de una inundación (USAID, 1993).

Las llanuras de inundación contienen gran humedad por estar próximas al nivel freático, por lo que también contribuye a la fertilidad de las tierras que desde hace mucho tiempo han sido ocupadas por el hombre para la producción de alimentos agrícolas. En la Ilustración 3 se puede observar lo que representa la llanura de inundación para un río lo que también se conoce como cauce mayor.

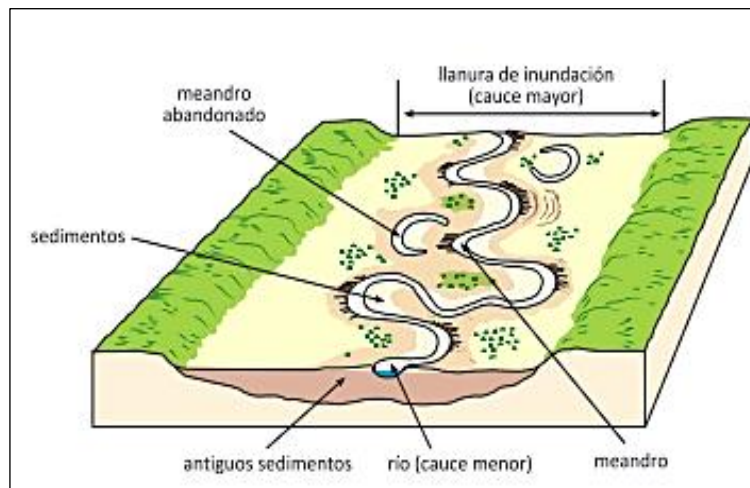


Ilustración 3. Llanuras de inundación. Fuente (Zaragoza, sf)

4.1.4 Medidas preventivas y de mitigación para la gestión de las inundaciones

La acción orientada a reducir la vulnerabilidad de la población frente a un medio hostil, con el objetivo de incrementar la capacidad de resistencia de los asentamientos humanos frente a la presencia de fenómenos naturales o humanos potencialmente destructivos se conoce como mitigación.

Tratar de evitar completamente la ocurrencia de un fenómeno es prácticamente imposible, además que los costos de las medidas preventivas no pueden ser justificados dentro del contexto social y económico de la región amenazada; pero si es posible reducir o atenuar los efectos de dichos eventos sobre los elementos expuestos a su acción (Villagrán, 1999).

La experiencia ha mostrado que para lograr un mejor manejo de las inundaciones se deben implementar las alternativas estructurales como las no estructurales. Las medidas estructurales corresponden a obras de ingeniería que modifican el sistema fluvial. Las medidas no estructurales corresponden a aquellas medidas que permiten una mejor convivencia de la comunidad con las crecientes, minimizando los impactos negativos a través de medidas de prevención como la zonificación de áreas de riesgos de inundación, los sistemas de pronóstico y alerta temprana, los seguros contra inundaciones y las medidas de protección individual (Tucci, 2007; Alveirinho, 2006).

Las medidas estructurales implementadas en la cuenca reciben el nombre de medidas extensivas y cuando se implementan en el río se denominan medidas intensivas (Tucci, 2007; Invías, 2011). En la Tabla 1 se da una breve descripción de las medidas estructurales.

Tabla 1. Descripción de los principales tipos de medidas estructurales

Medidas Estructurales		Ventaja	Desventaja	Aplicación
Extensivas	Cambio de la Cobertura Vegetal	Reducción del pico de la creciente	Inaplicable en áreas grandes	Cuencas Pequeñas
	Control de erosión	Reducción del escurrimiento	Inaplicable en áreas grandes	Cuencas Pequeñas
Intensivas	Construcción de Diques	Alto grado de protección	Generación de daños grandes si fallan	Ríos grandes
	Desobstrucción - Reducción de la rugosidad	Aumento de la capacidad de drenaje	Efecto puntual	Ríos pequeños
	Corte de Meandros	Aceleración del escurrimiento	Impacto negativo en ríos aluviales	Áreas de inundación estrechas
	Construcción de Represas	Regulación de la creciente	Difícil Localización	Cuencas medianas
	Canales de Desvío	Reducción del caudal en el canal principal	Dependencia de la topografía	Cuencas medianas y grandes

Fuente (ASOCAR- CVC -UNIVALLE, 2014)

Como se mencionó anteriormente las medidas estructurales son obras de ingeniería implementadas para reducir el riesgo de crecidas, las cuales pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que actúan en la cuenca, las cuales tratan de modificar las relaciones entre precipitación y caudal, como la alteración de la cobertura vegetal del suelo, que reduce y retarda los picos de crecidas y controla la erosión de la cuenca. Las medidas intensivas son aquellas que reaccionan en el río y pueden ser de tres tipos (Simons et.al., 1977): (a) aceleran el escurrimiento: construcción de diques y pólderes, aumento de la capacidad de descarga de los ríos y corte de meandros; (b) retardan el escurrimiento: reservorios y cuencas de amortiguamiento; c) desvío del escurrimiento: obras como canales de desvíos.

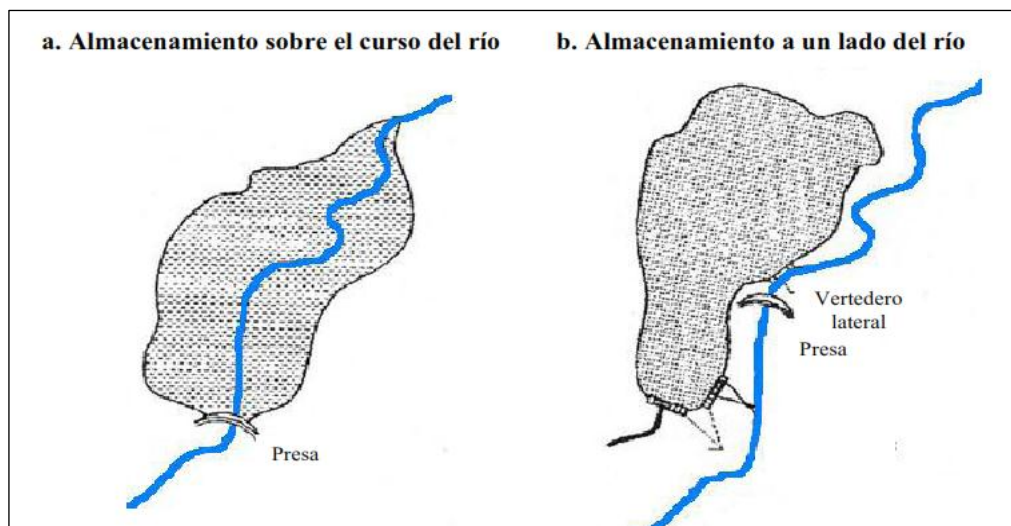
En general las medidas de tipo estructural son construcciones físicas, que consisten en la aplicación de técnicas de ingeniería con el objetivo de reducir o evitar posibles impactos de las amenazas a causa de las inundaciones, por lo tanto algunas alternativas de las medidas extensivas se encuentran:

- **Cobertura vegetal:** la cobertura vegetal tiene la capacidad de almacenar parte del volumen de agua precipitado por la interceptación vegetal y de aumentar la evapotranspiración y reducir la velocidad del escurrimiento superficial por la cuenca hidrográfica. Cuando se retira la cobertura vegetal la tendencia es el aumento del volumen escurrido, de las crecidas y la reducción de las sequías, aumentando la variabilidad de los caudales. El aumento de la cobertura es una medida extensiva para la reducción de las inundaciones, pero aplicable a pequeñas cuencas, donde tiene más efecto ($< 10 \text{ km}^2$). El mayor efecto de este tipo de medida se da sobre los eventos más frecuentes de alto riesgo de ocurrencia. Para eventos raros de bajo riesgo el efecto de la cobertura vegetal tiende a ser pequeño.
- **Control de la erosión del suelo:** el aumento de la erosión tiene implicaciones ambientales por el transporte de sedimentos y sus agregados, pudiendo contaminar los ríos aguas abajo, disminuir su sección y alterar el balance de carga y transporte de los ríos. Uno de los factores es la reducción de la sección de los ríos y el aumento de la frecuencia de las inundaciones en lugares de mayor sedimentación. El control de la erosión del suelo puede ser realizado por la reforestación, pequeños reservorios, estabilización de las orillas y prácticas agrícolas correctas. Esta medida contribuye para la reducción de los impactos de las inundaciones.

Un ejemplo de las medidas intensivas son los:

- **Reservorios:** El reservorio de control de crecidas retiene el volumen del hidrograma durante los incrementos del nivel del agua, por lo cual reduce el pico y el impacto aguas abajo de la presa. Los reservorios para control de inundaciones pueden ser de uso exclusivo a esta finalidad o pueden tener usos múltiples. El primero tiene como objetivo sólo minimizar las inundaciones, mientras que el segundo tiene más de un objetivo, lo cual

hace esta medida mucho más compleja. . En la Ilustración 4 se observa el almacenamiento de volúmenes de crecientes por diferentes presas



Fuente: Brandimarte (2002)

Ilustración 4. Almacenamiento de volúmenes de creciente por medio de presas

Otra medida que ya se mencionó anteriormente son las alternativas no estructurales las cuales no consideran como medida de mitigación la construcción física, sino que utiliza el conocimiento, las prácticas o acuerdos existentes para reducir el riesgo y sus impactos, por lo cual se utiliza como medio principal la política, la capacitación y educación, a continuación se nombran algunas de las medidas no estructurales:

- Políticas y planeamiento urbano
- Códigos de construcción,
- Legislación sobre el ordenamiento territorial y su cumplimiento
- Recursos informativos (comunicación) y programas de conciencia pública (UNISDR, 2009).
- Sistemas de predicción de inundaciones y alerta temprana,
- Sistemas de respuesta y evacuación por emergencias,
- Seguros e indemnizaciones,
- Planes de coordinación y procedimientos de operación (Escuder, et al., 2010).

Debido a que las medidas estructurales no se pueden proyectar para brindar una protección total, la estrategia más eficaz para la gestión de inundaciones se obtiene cuando se combinan las medidas estructurales con las no estructurales, ya que las últimas complementan a las primeras contribuyendo a disminuir los pérdidas a un costo menor (Escuder, 2010; Tucci, et al., 2006).

A continuación se da una descripción de algunas de las alternativas no estructurales.

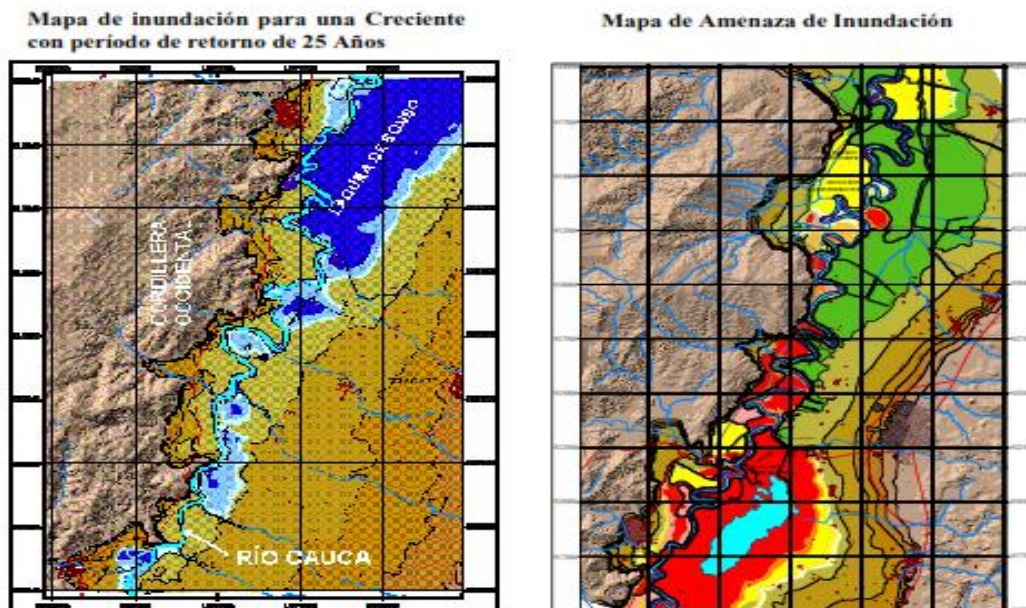
Sistema de pronóstico y alerta temprana Los sistemas de pronóstico y alerta temprana buscan avisar a la población en forma anticipada la ocurrencia de la creciente con el fin de que se tomen las medidas necesarias para disminuir los impactos negativos de la inundación (Hill y Verjee, 2012). Estos sistemas se conforman de tres fases: prevención, alerta y mitigación.

En la fase de alerta se realiza el acompañamiento durante la ocurrencia de los eventos de lluvia y en la fase de mitigación se desarrollan acciones para disminuir el impacto sobre la población una vez ha ocurrido la inundación; como pueden ser la reubicación de la población y de animales, la protección de sitios de interés público, el aislamiento de zonas de riesgo, etc. (Tucci, 2007).

Los Mapas de amenaza de inundación establecen las áreas que resultarán inundadas por crecientes correspondientes a tiempos de retorno seleccionados. Para la generación de estos mapas se debe tener una detallada topografía de las zonas sometidas a riesgo de inundación, además de realizar una modelación matemática con el fin de determinar la extensión de las áreas inundadas y la magnitud de la inundación en términos de los niveles de agua, las velocidades en la planicie, etc. (Ríccardi, 1997; Ramírez *et al.*, 2002; Ribera, 2004). En la Ilustración 5 se presenta el mapa de inundación para una creciente con un período de retorno de 25 años y el mapa de amenaza de inundación generado para el sector de la Laguna de Sonso en el Valle del Cauca, estudio que fue realizado por la Universidad del Valle y la CVC.

Los Mapas de riesgo de inundación son modelos que permiten evaluar y predecir las consecuencias de un evento de precipitaciones extraordinarias, lo cual permite identificar, clasificar y valorar las áreas potencialmente inundables del territorio (Bocanegra, 2013). La condición de riesgo se presenta únicamente cuando ocurre un evento natural en un área ocupada por actividades humanas que deben soportar las consecuencias de dicho evento. Por lo tanto, el riesgo es función de tres factores estrechamente interrelacionados: la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición.

Por lo anterior se tiene que las inundaciones constituyen las amenazas, por lo que desde esta perspectiva, la diferencia entre la amenaza y el riesgo es que la primera se refiere a la probabilidad de que se manifieste un evento natural, mientras que el segundo está relacionado con la probabilidad de que se den ciertas consecuencias (Fournier, 1985).



Fuente: (CVC- Universidad del Valle, 2007).

Ilustración 5. Mapas de Inundación y Amenaza de Inundación en el Sector de la Laguna de Sonso en el Valle del Cauca

4.1.5 Modelo Hidráulico

Para este estudio en la actualidad se dispone de varias herramientas matemáticas donde una de ellas es HEC -RAS 4.1 que es un sistema integrado, diseñado para un uso interactivo en ambientes multiusuarios. El sistema está compuesto de una interface gráfica para el usuario, análisis de componentes hidráulicos por separado, almacenamiento de datos y manejo de funciones, gráficos y facilidades en la generación de reportes.

La versión 4.1 de HEC-RAS soporta el cómputo de perfiles de agua en flujos permanentes y no permanentes. El modelo está diseñado para desarrollar cálculos hidráulicos en una dimensión para redes naturales y artificiales. El programa puede manejar una red compleja de canales, un sistema dendrítico o un solo río. El componente de flujo permanente analiza con flujos subcríticos, supercríticos, críticos y mixtos. El procedimiento básico de computación está basado en la solución unidimensional de la ecuación de energía. La pérdida de energía es evaluada por fricción (Ecuación de Manning) y coeficientes de contracción y/o expansión multiplicados por el cambio en la carga de velocidad. La ecuación de Momentum es utilizada en situaciones donde el perfil de agua es rápidamente variado; en estas situaciones se incluyen flujos mixtos, saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y evaluación de perfiles en la confluencia de ríos.

4.1.5.1 Cálculo de perfiles de agua superficial

Las ecuaciones para los cálculos básicos de los perfiles: Los perfiles de agua superficial son calculados de una sección a otra resolviendo la ecuación de energía mediante un sistema de iteraciones “Método del paso estándar”. La pérdida de energía entre dos secciones está compuesta por pérdidas de fricción y contracción.

Subdivisiones en las secciones transversales para cálculos de transporte de caudal: La determinación del transporte total y del coeficiente de velocidad para una sección transversal requiere que el flujo sea subdividido en unidades en las cuales la velocidad es uniformemente distribuida. El algoritmo utilizado por HEC-RAS subdivide el flujo en las áreas del canal principal utilizando la entrada de los valores de coeficiente de Manning. El transporte del flujo es calculado con la Ecuación de Manning que se presenta a continuación:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

Dónde:

K : Subdivisión para transporte

n: Coeficiente de rugosidad de Manning para la subdivisión

A: Área del flujo para la subdivisión

R: Radio hidráulico para la subdivisión

El programa suma todos los transportes para obtener el transporte adecuado en la banca derecha e izquierda. El canal principal es usualmente analizado como un elemento singular. El transporte total para la sección transversal es obtenido al sumar los tres subdivisiones de transporte (izquierdo, derecho, y canal principal).

4.1.5.2 Coeficiente de manning para el canal principal

El flujo en el Canal principal no se subdivide excepto cuando el coeficiente de rugosidad es cambiado en el área del canal. El programa determina si el valor de n que corresponde a la sección transversal puede ser subdividida o si el valor de n compuesto para el canal principal puede ser utilizado basado en el siguiente criterio:

Si la pendiente lateral del canal es más pronunciada que 5H:1V y el canal principal tiene más de un valor de n, se calcula automáticamente un valor de n_c compuesto.

El procedimiento coincide en dividir la sección hidráulica en las partes que sean necesarias y asignarles un valor de “n” de rugosidad según corresponda a su naturaleza física de oposición al flujo. Como las secciones están geométricamente definidas, el modelo evalúa con la fórmula anterior el valor de

rugosidad equivalente, ver los capítulos 2 y 3 del manual del HEC-RAS (páginas 2-6, 2-7 y 3-12 a 3-16) y el libro Hidráulica de Canales Abiertos, V.T. Chow (páginas 108 a 120 y página 135), del que se obtienen los valores de referencia que se presentan a continuación:

Finalmente, a partir del reconocimiento de los factores expuestos anteriormente, Cowan propone el siguiente procedimiento:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

Donde n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados, n_1 es un valor que debe agregarse para corregir el efecto de las rugosidades superficiales, n_2 considera las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n_3 es un valor para considerar las obstrucciones, n_4 tiene en cuenta la vegetación y las condiciones del flujo, y m_5 es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal como se puede observar en el

Tabla 2. Rugosidad Hidráulica de Manning en Cauces Según Chow y Cowan

Condiciones del Cauce		Valores de Rugosidad ($m^{1/3}/s$)	
Material del Lecho	Tierra	No	0.02
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava triturada		0.028
Grado de Irregularidad	Suave	n1	0
	Menor		0.005
	Moderado		0.01
	Severo		0.02
Variaciones de la Sección Transversal	Gradual	n2	0
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efectos Relativos de Obstrucciones	Despreciable	n3	0
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100

Condiciones del Cauce		Valores de Rugosidad ($m^{1/3}/s$)	
Meandros	Menor	m5	1
	Apreciable		1.15
	Severo		1.3

Fuente: (VEN TE CHOW, Hidrología Aplicada.)

4.1.5.3 Limitaciones del programa

Las siguientes hipótesis están implícitas en las expresiones analíticas utilizadas en la versión del programa:

- El flujo es gradualmente variado (con excepción de las estructuras hidráulicas como: puentes, tubos y vertederos). En estos casos el flujo puede ser rápidamente variado y la ecuación de momentum u otra ecuación empírica se utilizan.
- El flujo es unidimensional (los componentes de velocidad en otras direcciones que no son las del flujo no son contabilizados)
- Los canales de los ríos tienen que ser de pendientes pequeñas, por lo que debe ser menores de 1:10. Aunque para pendiente mayores las profundidades se corrigen dividiéndolas por el coseno del ángulo.

4.2 MARCO CONCEPTUAL

EL RIESGO: es la probabilidad de exceder un valor específico de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un tiempo de exposición determinado de una pérdida (Lavell, 1996). Además constituye una posibilidad y probabilidad de daños a determinadas condiciones en la sociedad, o en el componente de la sociedad bajo consideración (individuos, familias, comunidades, ciudades, infraestructura productiva, vivienda etc.).

El riesgo depende generalmente de dos factores: amenaza y vulnerabilidad, para lo que:

VULNERABILIDAD: son "las condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales o procesos, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de los peligros". Por lo tanto la vulnerabilidad es una serie o diversas características de la sociedad que los inclinan a sufrir impactos durante un evento físico externo e imposibilitando su recuperación (Lavell, 1996), en pocas palabras la vulnerabilidad hace énfasis en la propensión de una sociedad a sufrir daños, lo cual por sus condiciones hace difícil su pronta recuperación.

AMENAZA: es la posibilidad de la ocurrencia de un evento físico que puede causar algún tipo de daño a la sociedad. Por consiguiente la amenaza es un peligro latente que produce efectos negativos en la producción, la infraestructura, los bienes, servicios y el medio ambiente mediante la manifestación de un fenómeno de origen natural, socio-natural o antropogénico durante un periodo de tiempo. La amenaza surge cuando de la posibilidad teórica se pasa a la probabilidad más o menos concreta, de que un fenómeno de origen natural o humano se produzca en un determinado tiempo y en una determinada región que no esté adaptada para afrontarlo sin traumatismos (Ayala, 2009).

EXPOSICIÓN: Es la ubicación de personas o bienes económicos en zonas propensas a amenaza, por lo que este factor se manifiesta cuando los bienes o estructuras físicas se encuentran en el camino de las aguas de inundación (EIRD/ONU, 2011).

GESTIÓN DEL RIESGO: La gestión del riesgo es el conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la intervención de la amenaza y/o la vulnerabilidad, con el fin de disminuir o mitigar los riesgos existentes. Encaminándose a un proceso social complejo que conduce al planeamiento y aplicación de políticas, estrategias, instrumentos y medidas orientadas a impedir, reducir, prever y controlar los efectos adversos de fenómenos peligrosos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente. En pocas palabras es un conjunto de acciones integradas de reducción de riesgos, a través de actividades de prevención, mitigación, preparación, atención de emergencias y recuperación post impacto; además de responsabilidad según le compete a cada institución (Cardona, 2005).

MODELO HEC-RAS: es el Software por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos, siendo uno de los modelos hidráulicos más utilizados en la modelización hidráulica de cauces. El programa está diseñado para realizar cálculos hidráulicos en una dimensión, lo que le da su categoría de unidimensional, esto se realiza para una red completa de canales naturales o construidos por el hombre.

FENÓMENO DEL NIÑO Y LA NIÑA: El ciclo conocido como "el Niño" y su fase opuesta "la Niña" son los precursores de la variabilidad climática en la franja tropical del océano Pacífico, en la escala interanual; dando lugar a la aparición de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia (SIAC, 2013).

La estructura térmica superficial y sub-superficial del océano son alteradas por el debilitamiento de los vientos alisios que provienen del Este, por lo que el fenómeno "El Niño" y "La Niña" están directamente relacionadas con las anomalías que se registran en la temperatura del océano, además del área de expansión que cubren (SIAC, 2013).

INUNDACIÓN: Es un evento recurrente y natural que se produce en las corrientes de agua, como resultado de lluvias intensas o continuas que al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, desbordan e inundan los valles o llanuras de los ríos; es así como en el glosario internacional de Hidrología (OMM/UNESCO, 1974) define a la inundación como “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”.

LLANURAS DE INUNDACIÓN: Superficie del terreno prácticamente llana adyacentes a ríos o riachuelos, sujetas a inundaciones recurrentes (USAID, 1993).

5 METODOLOGÍA

En el estudio se plantean y evalúan diferentes medidas estructurales como son los diques marginales de protección, considerando diferentes distancias al cauce del río Cauca (60 m, 150 m y 200 m), con el fin de lograr una mejor gestión de las inundaciones causadas por los desbordamientos del río Cauca.

5.1 Recopilación y análisis de información disponible

Se realizó una revisión bibliográfica detallada sobre las inundaciones históricas en el Valle del Cauca originadas por el desbordamiento del río Cauca, además del análisis de factores que contribuyen al desarrollo de estos eventos en la zona de estudio específicamente en el valle alto.

También se recopiló y analizó información sobre las características (fisiográficas, climáticas, topográficas, batimétricas, hidráulicas, hidrológicas, cartográficas) del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca. Para ello se recopilaron y analizaron diferentes estudios disponibles, debiendo destacar los estudios de PMC realizados por la CVC y la Universidad del Valle.

Por otra parte, se investigó sobre los nuevos paradigmas y tendencias para la gestión del riesgo de inundaciones, y los impactos que éstas ejercen en los procesos hidrodinámicos de ríos aluviales con características similares a las del río Cauca.

5.2 Caracterización física, hidráulica, hidrológica y geomorfológica

En esta fase se realizó la caracterización de las condiciones actuales del río Cauca; para lo que se tuvo en cuenta el análisis de los diferentes aspectos y variables que caracterizan el comportamiento de la cuenca y el río. Esto permitió conocer el régimen hidrológico y analizar los procesos de evolución del valle aluvial y del río Cauca desde el punto de vista geológico y geomorfológico.

Para la caracterización del río Cauca se tuvo en cuenta el análisis de los aspectos hidrológicos, hidráulicos, sedimentológicos y geomorfológicos, mediante la revisión bibliográfica disponible, destacando los estudios que permitieron conocer la máxima capacidad hidráulica de conducción del río Cauca.

5.3 Construcción del modelo Hidrodinámico del Sistema Río Cauca – Tributarios - Humedales

Se implementó el modelo matemático unidimensional HEC-RAS 4.1 para simular las crecientes del río Cauca en el valle alto. Para esta etapa se utilizó toda la

información hidrológica, hidráulica y topográfica obtenida y analizada en el desarrollo de las dos primeras fases del proyecto.

Este proceso se compone por la esquematización, la calibración, verificación y el análisis de sensibilidad. Durante la etapa de calibración se revisó y ajustó los diferentes parámetros físicos y numéricos del modelo, tales como, la batimetría y la topografía del cauce del río Cauca y su planicie aluvial, las condiciones de frontera, rugosidad, los intervalos de espacio y tiempo computacionales, etc.

Generalmente el principal parámetro de calibración del modelo hidrodinámico es el coeficiente de rugosidad n de Manning, para el cual no existen estrategias automáticas de calibración en el modelo, y por ende, se calibró de forma manual a partir de la comparación de los niveles de agua y los caudales registrados, durante eventos de crecientes históricas en el río Cauca.

5.4 Planteamiento, modelación y evaluación de diferentes alternativas estructurales

Las alternativas estructurales utilizan obras civiles para la reducción del riesgo de inundación en áreas adyacentes a un cauce.

La construcción de las obras se realizan mediante la integración de varias alternativas, con el objetivo de producir el más bajo costo, o la mejor relación beneficio a costo, etcétera. Estas estructuras se diseñan comprendiendo la dinámica natural del río, permitiendo su régimen natural y respetando el curso natural del agua.

Entre las intervenciones estructurales se planteó la relocalización de diques a diferentes distancias (60 m, 150 m y 200 m), para lo cual se aplicó el sistema de modelación del río Cauca para determinar los posibles cambios en las condiciones hidrodinámicas, especialmente en los niveles de agua y originados por la implementación de las medidas estructurales propuestas para el control de las inundaciones en el valle alto del río Cauca.

Con base en los resultados obtenidos mediante la simulación de las diferentes medidas estructurales planteadas, en cuanto a la extensión de las condiciones hidrodinámicas y la extensión de las áreas inundadas, se realizó un análisis de los diferentes aspectos, tales como, ambientales, sociales, técnicos, económicos para finalmente seleccionar la alternativa que generara los mayores beneficios y los menores efectos adversos para la sociedad.

5.5 Determinación de mapas de inundación

Mediante los resultados obtenidos de la modelación matemática del río Cauca en el valle alto se generó los mapas de inundaciones para una creciente con el periodo de retorno de 30 años esto se realizó sin tener en cuenta ninguna medidas estructural existente. Para la realización del mapa de inundación se

exportaron los resultados de la modelación con HEC-RAS 4.1 a formato GIS desde el menú File de la ventana principal, opción Export GIS Data, para posteriormente utilizar la herramienta de Hec.GeoRas con el programa Arcgis, que permite realizar la modelación de los mapas de inundación.

6 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO

El río Cauca nace en el Macizo Colombiano, cerca del Páramo Sotará en el Departamento del Cauca, con ubicación 2° 00' latitud Norte y 76° 34' longitud Oeste, y desemboca en el Brazo de Loba del río Magdalena frente al Municipio de Pinillos, presentando una longitud de 1,350 km y un área de drenaje de 63,300 km²; brindando así grandes beneficios a los departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar, ya que el río es aprovechado para múltiples propósitos, como son la generación de energía, la extracción de materiales, la captación de agua, la pesca y actividades recreativas.

Por la gran variedad que presenta la topografía de la cuenca del río Cauca además de su extensión, se presentan diferentes pisos térmicos desde los páramos hasta las zonas cálidas; la temperatura se incrementa 1° C por cada 170 metros de descenso en altura; además por ubicarse en la posición de la zona ecuatorial, su clima se caracteriza por temperaturas relativamente altas que se mantienen durante todo el año (CVC-Universidad del Valle, 2007). Es así como el relieve, los vientos alisios y el predominio de las zonas de calma ecuatoriales o de convergencia intertropical favorecen el régimen pluvial de la zona por el cual las lluvias aumentan o disminuyen de acuerdo con la intensidad de los vientos. La región presenta una precipitación media anual de 1597 mm (±224 mm) y 21,3°C (±0,5°C) de temperatura media del aire (Puertas et al., 2011)

El río Cauca presenta a lo largo de su recorrido cuatro zonas: Alto Cauca, Valle Alto, Cañón del Cauca o Cauca Medio y Bajo Cauca; en la Tabla 3 se puede observar las áreas parciales de cada zona.

Tabla 3. Zonas de la Cuenca Hidrográfica del río Cauca

Zona	Área Parcial (km ²)	Área Acumulada (km ²)
Alto Cauca	4,814	3,608
Valle Alto	15,757	20,574
Cauca Medio	19,750	40,324
Bajo Cauca	18,750	59,074

Áreas calculadas en escala 1:250,000
Fuente: (CVC-Universidad del Valle, 2007)

En la Ilustración 6 se puede observar a manera de detalle el perfil longitudinal del recorrido en el río Cauca.

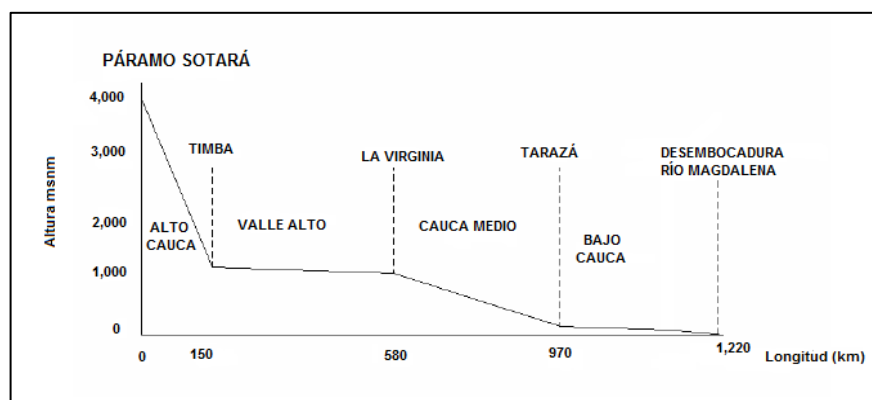


Ilustración 6. Perfil longitudinal de la cuenca del río Cauca

La cuenca alta del río Cauca limita por el sur con el río Desbaratado en su margen derecha y por la margen izquierda con el río Timba, y va hasta los límites con el departamento de Risaralda. Aproximadamente cuenta con un área de 10.900 km², distribuido en 34 municipios.

El tramo de estudio que comprende el valle alto del río Cauca tiene una extensión aproximada de 430 kilómetros de longitud y 20 kilómetros en promedio de ancho, con un área aproximada de 440,000 hectáreas (ha) de las cuales 100,000 (ha) se ubican en la zona marginal del río que es conocida como la llanura de inundación; con una altura entre los 900 y 1,000 msnm, con presentación de lluvias en promedio de 1,300 mm al año y una temperatura superior a los 24°C.

Debido a las repercusiones entre los siglos XIX y XX en donde el desarrollo naviero del río Cauca indujo a la tala y explotación de bosques. Las planicies y zonas inundables del río Cauca se convirtieron en zonas agrícolas y ganaderas. En donde por fertilidad y características fisiográficas el suelo del valle se ha utilizado para el cultivo de caña de azúcar, aproximadamente existen unas 200,000 (ha) cultivadas.

El aumento y crecimiento de la población, trajo consigo construcciones o modificaciones de tierras para la protección contra inundaciones cerca de la llanura de inundación, trayendo consigo la disminución de humedales. El censo del 2005 reporta que el 90% de la población está concentrada a lo largo del cauce del río Cauca en su valle alto, alcanzando un número aproximado de 4,2 millones de habitantes. Cabe mencionar que la ciudad de Cali, Jamundí y Yumbo conforman el desarrollo comercial, industrial y urbanístico del departamento del Valle del Cauca.

En total la CVC ha descrito en sus investigaciones que aproximadamente 82,945 (ha) han sido afectadas directa o indirectamente por las inundaciones producidas por el río Cauca, y cuenta con los registros de áreas inundadas a partir de 1950.

Actualmente existen 49 humedales lenticos con un área aproximada de 2,950 ha y 2 ciénagas, los cuales deben ser protegidos para evitar su desaparición. La Laguna de Sonso o del Chircal, con un área de reserva de 2,045 (ha) es considerada la única laguna, que aún queda en el valle alto del río Cauca.

El valle alto del río Cauca se localiza en un valle interandino que posee suelos fértiles, que además por su ubicación se destaca como una zona estratégica para el desarrollo económico que se centra principalmente en la agricultura como es el caso de las industrias azucareras, zonas de producción de algodón; además de las zonas de desarrollo minero.

Durante el recorrido de la cuenca alta del río Cauca, que comprende desde Timba en el departamento del Cauca hasta la Virginia en el departamento de Risaralda, se presenta la confluencia de 42 tributarios que provienen de la vertiente occidental de la Cordillera Central y de vertiente oriental de la Cordillera Occidental. De estos, 32 sub-cuencas corresponden al valle alto del río Cauca, con un área total de drenaje de 11,443 km² que aumentan el caudal medio del río hasta tres veces, ya que recibe un caudal promedio de 260 m³/s que en épocas de la presencia del fenómeno de la niña sufre un mayor incremento de sus niveles (MAVDT et al., 2009), en la Ilustración 6 se observa la distribución o la red geodésica de la cuenca del río Cauca.

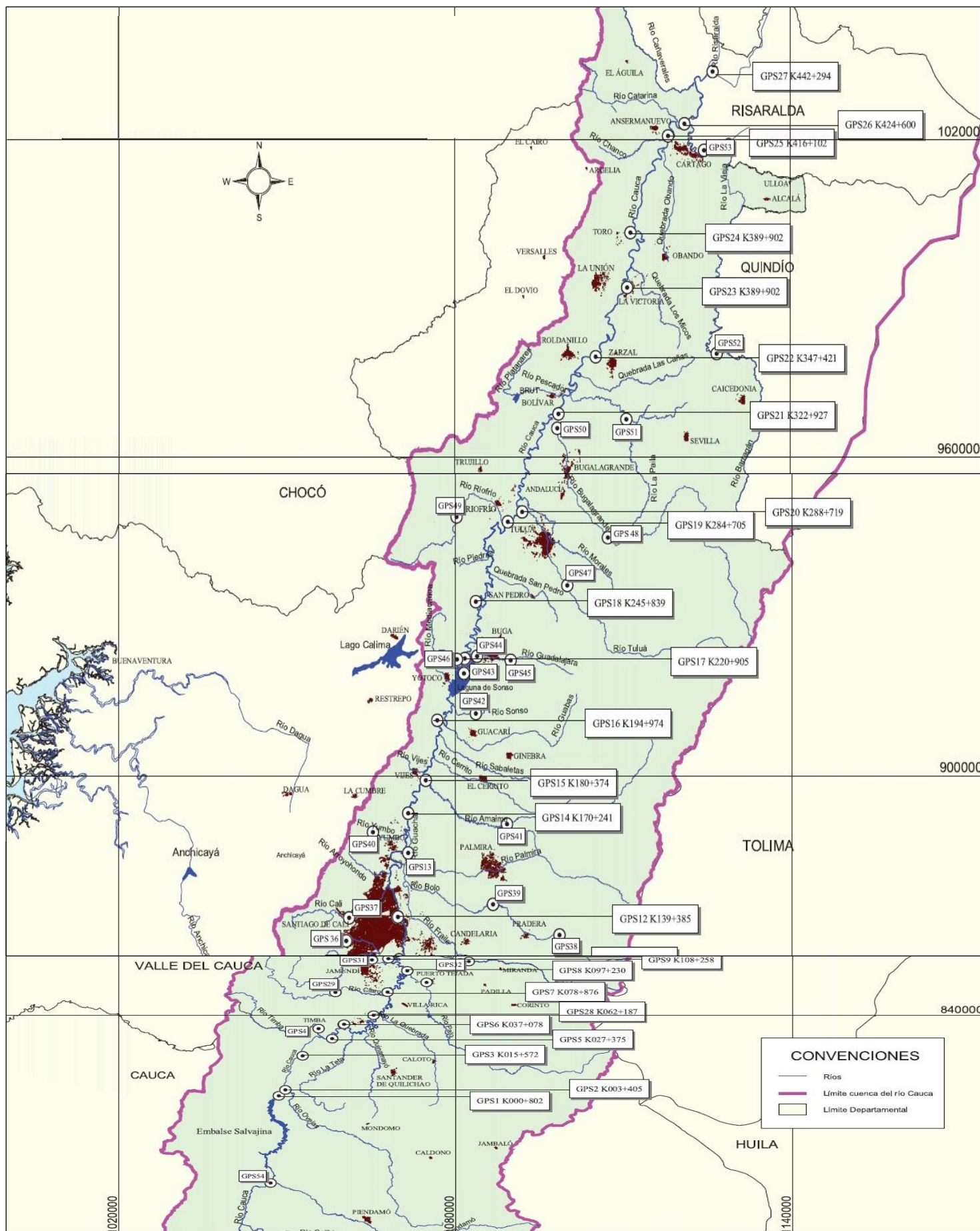


Ilustración 7. Red geodésica río Cauca.

Fuente: *El río Cauca en su valle alto* (CVC-Universidad del valle, 2007)

6.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS TRIBUTARIOS DEL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO

En la fase I del proyecto PMC volumen IV (CVC – Universidad del Valle, 2000a) se desarrolló una caracterización física de los tributarios del río Cauca en su valle alto, gracias a ello se puede realizar una descripción general de los tributarios de gran aporte o de gran importancia para el tramo en estudio ubicados de sur a norte, entre estos se encuentran:

6.1.1 Río Ovejas

Presenta un caudal medio de 25,1 m³/s desembocando en la abscisa K 3 + 421 de la margen derecha del río Cauca, con una longitud aproximada de 62 km. La cuenca tiene un área de drenaje de 823 km² con una pendiente entre el 50 % y el 100 %.

La parte inferior de la cuenca está constituida geológicamente por la formación de Popayán de edad terciario-cuaternario del cual forma parte los sectores el Pescador, Melcho, Carpintero, Corrales, Morales y Piendamó, sus suelos pueden clasificarse como de fertilidad moderada a alta.

6.1.2 Río Timba

El río Timba desemboca en la margen izquierda del Río Cauca en la abscisa K 24 + 493, aguas abajo de Salvajina, cuenta con área de drenaje de 512.98 km², registra un caudal medio de 22.5 m³/s en la estación Timba, además de que posee una longitud de 40.46 km.

La cuenca del río Timba tiene entre sus afluentes principales el río Chupadero, Marilópez y el río Silencio. En su parte baja se caracteriza por la explotación carbonífera que trae consigo grandes consecuencias por la contaminación del agua; además de sus fuertes pendientes de más de 100%.

6.1.3 Río Palo

El río Palo posee un caudal medio de 35.9 m³/s y desemboca en la abscisa K 100 + 107 de la margen derecha del río Cauca. La cuenca posee un área tributaria de 1,471 km²; con una longitud del cauce principal de 46.21 km, presenta una pendiente de cauce del 5.32% y una sinuosidad de 1.05. Este río nace en el Nevado del Huila y atraviesa los municipios de Páez, Toribío, Caloto, Santander de Quilichao y Puerto Tejada. Los tributarios principales son los ríos López, Jámbalo y Paila.

6.1.4 Río Jamundí

El río Jamundí registra un caudal medio de 10.9 m³/s y su cuenca tiene un área tributaria de 252.2 km² hasta la estación puente carretera, desembocando en la abscisa K 111 + 666 de la margen izquierda del río Cauca, pasando por los

municipios de Jamundí y Cali. Su cauce principal cuenta con dos tributarios, el río Pance y Jordán. El río recorre desde norte a sur hasta la región de San Miguel, sitio donde cambia su dirección de oeste a este.

6.1.5 Río Amaime

Desemboca en la margen derecha del río Cauca en la abscisa K 185 + 132, aguas debajo de salvajina, tiene una superficie de 482.15 km² hasta la estación Amaime, con una longitud del cauce de 44.34 km, presentando un caudal medio de 7.8 m³/s hasta la estación Los Ceibos. Su complejo relieve incluye pocas zonas planas, predominando zonas quebradas y abruptas con pendientes superiores al 50%.

6.1.6 Río Guadalajara

Desemboca en la margen derecha del río Cauca en la abscisa K 229 + 010, su cuenca tiene una longitud de 17 km; un área de drenaje de 130.3 km² y presenta un caudal de 4.0 m³/s. Sus aguas sirven de abastecimiento para el municipio de Buga, además de ser utilizada para la industria agropecuaria y de la generación de energía.

6.1.7 Río Riofrío

La cuenca tiene un área de drenaje de 392.12 km², su cauce principal presenta un caudal medio de 6.7 m³/s en la estación Salónica, desembocando en la margen izquierda del río Cauca en la abscisa K 291 + 847, con una longitud de 40 km. Sus principales tributarios son el río Lindo y Cáceres; a su vez, el afluente más importante del río Cáceres es el río Culebras que baña la población de Trujillo.

La cuenca presenta dos periodos secos y dos periodos lluviosos, el primero se da en los meses de Enero y Febrero en el primer semestre y Julio, Agosto y Diciembre en el segundo; y para los lluviosos en el mes de Marzo - Mayo en el primer semestre y Octubre - Noviembre en el segundo semestre

6.1.8 Río Tuluá

Confluye sobre la margen derecha del río Cauca en la abscisa K297+779, es una de las más extensas de las cuencas hidrográficas en el río Cauca, con un caudal medio de 15.7 m³/s en la estación Mateguadua y una extensión total de 732 km²; la longitud que presenta el cauce principal es de 45.75 km, además de estar conformada por los siguientes tributarios: Cofre, Loro, San Marcos y las quebradas Nogales y San Antonio, siendo el río Cofre el de mayor área y longitud.

El suelo de la cuenca del río Cauca está dado principalmente por la ganadería de libre pastoreo, en especial en la parte media-alta y en la parte baja entre los cascos urbanos del municipio de Tuluá, debido a las prácticas inadecuadas de la ganadería en la zona ha conllevado a que se presenten y se acrecienten los procesos erosivos de la cuenca.

Cabe mencionar que también existen prácticas agrícolas en la cuenca pero en menor proporción, ya que se cultiva solo para la subsistencia de algunos pobladores, destacando el cultivo de café como el de mayor extensión.

6.1.9 Río Bugalagrande

El río Bugalagrande es utilizado para la extracción de materiales de construcción, siendo el de mayor importancia para el centro del Valle, su explotación ha conllevado a que en el cauce haya cambiado a través del tiempo.

Presenta un caudal medio de $14.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación El Placer, desembocando en la abscisa K 331 + 894 ubicada en el flanco occidental de la Cordillera Central, en el departamento del Valle. La cuenca tiene un área de 714.80 km^2 desde las altas estribaciones en el Páramo de Barragán hasta la estación limnigráfica Puente Variante.

6.1.10 Río La Vieja

Para el norte del Valle y el Quindío el río la Vieja es uno de los más importantes para la extracción de materiales de construcción, pero su sobreexplotación ha conllevado a que se presente una gran variación en las zonas de aprovechamiento.

El río La Vieja presenta un caudal medio de $95 \text{ m}^3/\text{s}$, con una longitud del cauce de 207 km, desembocando en la abscisa K 437 + 421 sobre la margen izquierda del río Cauca; además la cuenca posee un área de drenaje de $2,870 \text{ km}^2$, constituyendo como el de mayor aporte para el río.

6.1.11 Río Risaralda

Nace en el sur del departamento de Antioquia a una altura de 3,200 msnm, la cuenca está ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental con una orientación norte-sur y de forma alargada, además presenta un área de $1,469 \text{ km}^2$ y la longitud de su cauce principal es de 110 km con un ancho máximo de 31.9 km.

Su cauce principal presenta un caudal medio de $27.2 \text{ m}^3/\text{s}$ desembocando en la abscisa K454 + 736 de la margen izquierda del río Cauca, además recorre los departamentos de Risaralda y Caldas, drenando las aguas de trece municipios. Sus principales tributarios son los ríos Guática en la parte alta de la cuenca y El Mapa en el costado Sur-Occidental.

6.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO

La geometría hidráulica del río Cauca se analizó y caracterizó mediante los estudios de PMC en el tramo de Salvajina-Virginia, para lo que se tuvo en cuenta la relación existente del caudal, los niveles del agua y los distintos parámetros

geométricos e hidráulicos , como son el: ancho, profundidad, velocidad del flujo, etc. Para lo que gran parte del análisis se realizó a partir de la información disponible en las distintas estaciones hidrométricas ubicadas a lo largo del tramo en estudio: La Balsa, La Bolsa, Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, Guayabal, La Victoria, Anacaro y La Virginia.

El río Cauca tiene una ancho medio de 105 metros y una profundidad media a banca llena de 7.4 metros; para lo que el ancho a banca llena varía entre 80 y 105 metros, para el tramo de Salvajina-Virginia (CVC – Universidad del valle, 2000c). El perfil longitudinal del río presenta una forma cóncava con pendiente hidráulica que puede oscilar entre valores promedios de 7×10^{-4} (Salvajina-La Balsa) y 1.5×10^{-4} (tramo Mediacanoa-Anacaro). El coeficiente de rugosidad de Chezy presenta un valor promedio de $47 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ (CVC – Universidad del Valle, 2000c).

6.2.1 Relaciones en la geometría hidráulica

Las relaciones se dan entre las variables geométricas de la sección transversal en este caso la profundidad (D), el ancho de superficie (B) y el área (A), se presentan de una forma empírica, como también las relaciones existentes con el flujo del agua, como es el (Q), el nivel del agua (H) y la velocidad (V).

Para la determinación de las relaciones se tuvo en cuenta las investigaciones de Leopold y Malddock (1953), lo cuales hallaron una función potencial que ayudan a establecer dichas relaciones; a continuación se describen las ecuaciones.

$$B = a \times Q^b \quad \text{Ec. 1}$$

$$D = c \times Q^d \quad \text{Ec. 2}$$

$$V = e \times Q^f \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

B: Ancho de la superior o de la superficie de agua (m)

D: Profundidad del flujo (m)

V: Velocidad media (m/s)

a, c y e: Coeficientes de proporcionalidad

b, d y f: Exponentes de las ecuaciones

En la

Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de las relaciones halladas para las estaciones hidrométricas en el río Cauca, tramo comprendido entre Salvajina – Virginia, además en la tabla se consignan los valores medios para el río.

Tabla 4. Coeficientes y exponentes de las relaciones de Leopold y Maddock para el río Cauca

ESTACIÓN	PERIODO	$B=a.Q^b$		$D=c.Q^d$		$V=e.Q^f$		$b+d+f$	a.c.e	$B=c^1.Q^{e1}$	
		a	b	c	d	e	f			c1	e1
Suárez	Post-Salvajina	17,615	0,191	0,315	0,322	0,180	0,480	1,000	1,000	5,547	0,519
La Balsa	Pre-Salvajina	60,510	0,009	0,427	0,351	0,038	0,640	1,000	1,000	25,849	0,359
	Post-Salvajina	47,087	0,076	0,490	0,278	0,043	0,646	1,000	0,990	23,077	0,354
Tablanca	Pre-Salvajina	52,887	0,024	0,544	0,321	0,034	0,655	1,000	0,990	28,786	0,345
	Post-Salvajina	49,984	0,035	0,542	0,308	0,036	0,657	1,000	1,000	27,111	0,343
La Bolsa	Pre-Salvajina	53,626	0,055	0,134	0,599	0,139	0,347	1,000	0,990	7,177	0,653
	Post-Salvajina	75,146	0,035	0,178	0,527	0,075	0,438	1,000	1,000	13,401	0,562
Hormiguero	Pre-Salvajina	18,529	0,286	0,130	0,526	0,424	0,188	1,000	1,000	2,358	0,812
	Post-Salvajina	45,915	0,133	0,157	0,512	0,138	0,355	1,000	0,990	7,229	0,645
Juanchito	Pre-Salvajina	37,964	0,134	0,092	0,617	0,289	0,300	0,990	1,000	3,472	0,752
	Post-Salvajina	36,715	0,127	0,133	0,567	0,209	0,300	1,000	0,990	4,891	0,694
Mediacanoa	Pre-Salvajina	56,081	0,086	0,132	0,593	0,135	0,320	1,000	0,990	7,407	0,679
	Post-Salvajina	58,797	0,083	0,078	0,679	0,219	0,239	1,000	1,000	4,568	0,761
Guayabal	Pre-Salvajina	63,783	0,093	0,149	0,538	0,113	0,355	0,980	1,070	8,889	0,643
	Post-Salvajina	61,770	0,096	0,131	0,563	0,123	0,343	1,000	0,990	8,070	0,659
La Victoria	Pre-Salvajina	80,313	0,070	0,056	0,690	0,233	0,240	1,000	1,000	4,487	0,760
	Post-Salvajina	67,697	0,096	0,055	0,698	0,268	0,207	1,000	0,990	3,731	0,793
Anacaro	Pre-Salvajina	60,576	0,086	0,181	0,511	0,091	0,404	1,000	1,000	10,961	0,597
	Post-Salvajina	42,450	0,127	0,136	0,547	0,173	0,326	1,000	0,990	5,791	0,674
La Virginia	Pre-Salvajina	129,930	0,011	0,084	0,594	0,091	0,394	1,000	1,000	10,960	0,605
Promedio	Pre-Salvajina	61,393	0,085	0,193	0,534	0,159	0,384	0,970	1,004	11,035	0,621
río Cauca	Post-Salvajina	50,318	0,011	0,222	0,500	0,146	0,399	1,000	0,994	10,342	0,600

Fuente: (CVC-Universidad del Valle, 2007)

Los valores registrados para el exponente (f) tienen una gran variación, para lo cual los valores altos se registran entre la estación de Suarez y Tablanca, por lo que en esta zona se presentan mayores velocidades pero menores profundidades debido a la fuerte pendiente que se presentan en este tramo.

Debido a lo anterior se puede observar que en el mismo tramo el exponente (d), presentan los menores valores, lo cual es coherente con una mayor pendiente menor profundidad, a diferencia de lo que se observa entre el tramo la estación La Bolsa y La Virginia donde la pendiente disminuye y a su vez merma considerablemente la velocidad, afectando así las condiciones hidráulicas en el cauce, esto se puede denotar por las grandes profundidades que existen en este tramo.

Se puede denotar que los valores registrados para el exponente (b) que forma parte de la $B=a \times Q^b$ Ec. 1, para la variación potencial del ancho presenta datos muy bajos, lo que significa que el ancho del cauce está más influenciado por el caudal.

Cabe destacar que en el periodo de post-Salvajina, para las estaciones La Balsa y Tablanca en la zona de gran pendiente, el área del flujo mermó, mientras en la estación la Bolsa y Hormiguero aumentó; pero no hubo diferencia o cambios significativos entre el área hidráulica y el caudal en la estación de Juanchito aguas abajo.

6.2.2 Caudal a banca llena

Los caudales a banca llena son medidos a partir del período Post-Salvajina, para lo cual se presenta una gran diferenciación en todo el cauce del río Cauca, tal como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Caudales y ancho a banca llena en el río Cauca

Estación	CAUDAL m ³ /s				Ancho Banca Llena (m)
	Banca Llena	Creciente anual más probable (Q1,58)	Creciente media anual (Q2)	Periodo de retorno de 5 años (Q5)	
La Balsa	492	426,8	461,9	569,9	65
Tablanca	747	447,2	484	597,4	60
La Bolsa	737,2	452,9	505	665,3	90
Juanchito	785,5	593,4	658,5	858,7	90
Mediacanoa	456	609	667	845,3	90
Guayabal	868,6	716,3	782,4	985,5	100
La Victoria	826	728,7	790,9	982,1	120
Anacaro	1744	775,5	841,9	1046,1	140

Fuentes: (CVC-Universidad del Valle, 2007), (CVC-Universidad del Valle, 2000c)

De la anterior información se puede ver como aumenta el caudal a lo largo del cauce desde la estación La Balsa hasta la estación de Juanchito, ya que para Mediacanoa se observa una disminución significativa del caudal, lo que demuestra la alta vulnerabilidad de esta zona en temporada de invierno debido a la posibilidad de inundaciones, ya que en este sector se denota una baja capacidad de conducción del cauce; que después aumenta para las estaciones desde el tramo de Guayabal – Anacaro.

El ancho a banca llena del río Cauca desde la Balsa hasta Mediacanoa tiene un valor entre 65 – 90 metros; el cual aumenta desde la estación Guayabal hasta Anacaro presentando valores desde 100 -140 metros respectivamente. En términos generales se presentan pequeñas disminuciones en el ancho del cauce en los tramos La Balsa-Tablanca, La Bolsa-Mediacanoa y Anacaro-La Virginia.

6.2.3 Rugosidad

Para la determinación de la rugosidad en el proyecto de PMC para el río Cauca se utilizó el método que propuso Van Rijn (1993), partiendo de pruebas de laboratorio en canales con lechos de arena.

En la parte alta del río Cauca tramo la Balsa - La Bolsa, se presentan los menores valores según estimativos del coeficiente de Chezy; estos resultados se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Coeficientes de rugosidad de Chezy según Van Rijn para las estaciones hidrométricas en el río Cauca

ESTACIÓN	No DE DATOS	COEFICIENTE DE CHEZY ($m^{1/3}/s$)
La Balsa	12	37,9
La Bolsa	14	33,5
Hormiguero	13	41,1
Juanchito	2	46,5
Mediacanoa	10	44
Guayabal	9	45,3
La Victoria	2	43,2
Anacaro	11	55,9
La Virginia	8	41,5

Fuente: (CVC-Universidad del Valle, 2007)

Aunque en la tabla anterior no se consignan el tamaño de los sedimentos que es un principal parámetro a tener en cuenta, ya que la dimensión influencia mucho sobre la rugosidad del cauce, por lo que es necesario realizar mediciones en el material del fondo del río, ya que el diámetro de los sedimentos varía a lo largo del cauce.

Aunque en las estaciones de La Balsa y La Bolsa se registran los menores valores de rugosidad, se puede observar que en las demás estaciones este parámetro se mantiene de forma constante, presentando un promedio del coeficiente de rugosidad de Chezy de $45,35 m^{1/3}/s$.

6.2.4 Sinuosidad

La sinuosidad de una corriente se define como la relación que existe entre la longitud del thalweg (eje de mayor profundidad en el río) y la longitud del valle, para lo que el tramo comprendido entre la Salvajina – La Virginia del río Cauca, su sinuosidad tiene un valor promedio de 2,0, por lo que se puede considerar entre media y alta (CVC-Universidad del Valle, 2007).

En el estudio de la fase I del proyecto PMC volumen VIII (CVC – Universidad del Valle, 2000b), se determinó la sinuosidad de los tributarios de la parte alta del río Cauca, para lo que la zona de estudio fue determinada para 10 tramos, teniendo como resultado que la sinuosidad más baja (1.21) se presenta en el tramo superior, comprendido entre Salvajina y una sección localizada unos 2 Km aguas arriba de la desembocadura del Río Timba, en tanto que la máxima sinuosidad se halla en el tramo comprendido entre la abscisa K53+000 (unos 16 Km aguas abajo de la estación Tablanca) y la desembocadura del Río Desbaratado (K125+490) con 3.06. La sinuosidad media de todo el tramo Salvajina – La Virginia es igual a 2.0, por lo que el río Cauca como se mencionó anteriormente se considera como un cauce de meandricidad media alta.

6.2.5 Pendiente hidráulica

La pendiente en el valle alto del río Cauca se puede dividir en tres tramos, que son en los que manifiestan diferentes valores, entre los que esta:

- Salvajina – Tablanca, con una pendiente media de 7×10^{-4}
- La Bolsa – Juanchito, presentando una pendiente de 2×10^{-4}
- Mediacanoa – Anacaro, con una pendiente media aproximada a $1,5 \times 10^{-4}$

En el caso de los tributarios del río Cauca se registran mayores pendientes, aunque estos estudios datan de los años de 1976 y 1978, pero cabe destacar que los tributarios son ríos de montaña, para esto se tiene los ríos Ovejas y Timba presentan una mayor pendiente, que está alrededor de ($74,0 \times 10^{-4}$ y $62,3 \times 10^{-4}$, respectivamente); que tiene una gran diferencia de los río la Vieja y Guachal que reportan las menores pendientes ($1,5 \times 10^{-4}$ y $2,6 \times 10^{-4}$ respectivamente (CVC-Universidad del Valle, 2007).

6.3 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DEL RIO CAUCA

El valle del río Cauca está formado por una fosa tectónica (bloque hundido) entre las cordilleras Occidental y Central (bloques levantados). Geológicamente la margen oeste de la cordillera Central corresponde a las rocas ígneas efusivas y sedimentarias de los periodos Jurásico - Cretácico y Terciario, respectivamente. En la cordillera Occidental está compuesto por rocas metasedimentarias y sedimentarias volcánicas marinas. El centro del Valle está constituido por un

amplio y grueso relleno aluvial Cuaternario, formando enormes conos aluviales coalescentes que bajan de las dos cordilleras, debido a la actividad tectónica y a depósitos aluviales desarrollados por el mismo río Cauca y sus tributarios (Zúñiga et al., 2005).

Debido a lo anterior se puede decir que el valle del río Cauca está constituido por una gran variedad de geoformas, con relieves montañosos, escarpados, colinados, valles y planicies aluviales, desarrolladas por la dinámica del río durante el período cuaternario, delimitado por la cordillera Occidental y Central.

Es así como el valle del río Cauca se constituye en una gran unidad morfológica de planicie aluvial, a lo largo del valle se encuentran afloramientos de gran variedad de macizos rocosos constituidos por diferentes tipos de rocas que constituyen controles litológicos y restringen la movilidad horizontal del cauce (CVC-Universidad del Valle, 2000a).

Las unidades morfológicas del río Cauca en su parte terminal en la zona de piedemonte crea un conjunto morfoestructural que tiene diferencia del sistema cordillerano en su longitud, relieve, además de su menor complejidad, tanto estructural como genética (CVC-Universidad del Valle, 2007).

En el estudio de caracterización del río Cauca (CVC-Universidad del Valle, 2000a), para el componente geomorfológico se tuvo en cuenta dos factores principales que se relacionan con la dinámica fluvial, como son: las formas deposicionales que son la principal causa de pérdida de transporte en el río; debido al proceso constructivo de depositación sobre la superficie terrestre, formando así paisajes como resultado de la acumulación de materiales.

El segundo factor son las formas erosiónales que por tratarse de una zona plana se limitan a las producidas por las corrientes en el cauce del río, principalmente en los meandros. Tanto la erosión como el depósito están involucrados en la formación de los meandros (ver Ilustración 8), que se da por el material desprendido de las orillas que se desplazan hacia la parte baja del río, depositándose en las zonas de mínima turbulencia como en los centros del cauce o en el lado interior de la siguiente curva.



Ilustración 8. Meandros típicos en el valle del río Cauca

Fuente: Caracterización del río Cauca y sus tributarios (CVC-Universidad del Valle, 2000a)

Otro tipo de geoformas en el río Cauca son las asociadas a su valle, donde se destaca:

- Zona de vertiente: corresponden a las zonas montañosas de la cordillera Occidental y cordillera Central, por lo que en su parte central se halla el relleno aluvial; además presentan un pendiente moderada a fuerte.
- Zona de colinas: se constituyen por rocas sedimentarias, formadas en ambientes fluvio – torrenciales y lacustres; este fenómeno se presenta en los extremos sur (Villarrica, Pance y Meléndez) y norte en el departamento Zarzal y Cartago.
- Zona de abanicos: se ubican hacia la margen derecha del río Cauca (ríos Bolo, Frayle y Desbaratado, entre otros). Se ubican entre la zona vertiente y la planicie aluvial del río Cauca, estas formaciones se dan gracias a los grandes tributarios por su gran transporte de material que es depositado en la planicie aluvial. Los depósitos aluviales y coluviales representan una característica de unidades generadores de geoformas de la planicie aluvial del río Cauca.

En la Tabla 7 se puede observar la descripción de los depósitos aluviales y coluviales en el río Cauca, además de una descripción de cada una de ellas mediante el estudio de la Modelación Matemática del Río Cauca (CVC-Universidad del Valle, 2001), donde se tuvo en cuenta las definiciones de Thornbury W.D. (1955) y la (CVC – Ingeominas, 1971).

Tabla 7. Depósitos aluviales y coluviales en el río Cauca

DEPÓSITOS		DEFINICIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL RÍO CAUCA
Aluviales	Barras y Playas aluviales Q1	Son depósitos inestables acumulados y emergen en épocas de aguas bajas y medias	Las playas aluviales desarrolladas en el río Cauca sobre el lado interno de las curvas de meandros son de poca extensión debido a la intensa extracción de materiales de arrastre en el río. Se presentan esporádicamente y se encuentran en medio del cauce del río e indican su antigüedad y estabilidad, en su mayoría se encuentran ubicadas en las curvas internas del cauce y actualmente están siendo explotadas para materiales de construcción.
	Depósitos de pantanos aluviales y zonas pantanosas permanentes Q2	Los pantanos aluviales son depósitos acumulados en las llanuras de inundación, después de los albardones naturales. Las zonas pantanosas permanentes son áreas más bajas que el nivel general del valle, con abundancia de lagunas circulares pequeñas sin desagüe, nacientes y ciénagas	Se presentan como consecuencia de la proximidad del nivel freático en una zona limitada por el albardón natural del río Cauca. Generalmente presenta problemas de salinidad en los suelos
	Cauces antiguos abandonados y tapones arcillosos Q3	Los cauces antiguos abandonados son antiguos lechos de ríos y arroyos. Los tapones arcilloso se forman en un cauce abandonado y aíslan una lagunas semilunar, la cual se conoce comúnmente como madreveja	Las madrevejas se presentan a todo lo largo del río Cauca y los tapones arcillosos se encuentran asociados sólo a las entradas y salidas de las madrevejas
	Albardones Naturales Q4	Son crestas bajas paralelas al curso del río, pierden altura y pendiente a medida que se alejan del mismo	Pueden tener un ancho de 1500 m o más, su mayor altura se presenta cerca al cauce del río. Estas geoformas son las más comunes y extendidas a todo lo largo del valle del río Cauca
	Zonas resecaas y rellenos de cauce Q5	Las zonas resecaas son zonas de antiguos pantanos, resecaas e inundadas en varios períodos y finalmente secadas artificial o naturalmente. Los rellenos de cauce son depósitos en los cauces secos abandonados	Todos los cauces naturales antes de la desembocadura en el río Cauca y durante gran parte de su recorrido forman estos depósitos y su tamaño depende de la capacidad fluvial para transportar y depositar material
	Cauce aluvial y cauces secos en conos Q6	Los cauces aluviales son depósitos aluviales acumulados en las llanuras y márgenes de los ríos y arroyos. Los cauces secos son depósitos acumulados en los ríos que cruzan los conos	
	Albardones Semilunares Q7	Bancos que se desarrollan en el lado interno de la curva de un meandro y crecen por adición lenta de sedimentos	En el recorrido por el río Cauca no se logra identificar ni delimitar estas geoformas en toda su extensión. A menor escala es posible observar sobre las curvas internas depósitos menores correspondientes a barras aluviales semilunares y barras de punta, los cuales se depositan naturalmente debido a la pérdida de energía del río
Coluviales y Mixtos	Conos aluviales Qd	Son formas resultantes de la acumulación de los sedimentos transportados por corrientes fluviales procedentes de las altas vertientes, que encontraron una disminución marcada de la pendiente en las partes bajas de las montañas para su depositación	Los cauces que desembocan en el río Cauca, desde Suárez hasta el río Cali, no desarrollan conos aluviales y solo algunos, como el río Palo, muestran depósitos muy pequeño. A partir de la desembocadura del río Cali hacia el Norte se desarrollan estas geoformas que varían en tamaño, amplitud sobre el río, longitud, textura y composición. Se observan conos aluviales en las desembocaduras de los ríos Cali, Yotoco, Piedras, Riofrio y Catarina y en la quebrada Hato Viejo.
	Depósitos coluviales Qc	Son depósitos constituidos por detritos acarreados dentro del valle por el lavado de las pendientes y mezclados en cantidades variables con el material del talud	Estos depósitos se presentan especialmente en el piedemonte de la cordillera y se observan en fotografías aéreas en aquellos sectores donde la cordillera está muy próxima al río
	Terrazas antiguas y explotaciones mineras a cielo abierto Em	Las terrazas son superficies topográficas que indican niveles de valles antiguos.	Algunas de estas geoformas son antrópicas. Corresponden a bancos de explotación por terraceo, además de algunas bermas de acceso a los frentes elaborados durante la explotación de oro aluvial en épocas pasadas. Se desarrollan sobre ambas márgenes y alcanzan hasta 4.0 m de altura.

Fuente: (CVC-Universidad del Valle, 2001)

6.3.1 Controles litológicos

Las unidades geológicas y geomorfológicas resistentes a la meteorización física y química, que impiden la progresión de meandros y el incremento de sinuosidad del cauce se conoce como control litológico (CVC-Universidad del Valle, 2007).

En el cauce del río Cauca estos controles lo establecen rocas duras o poco meteorizadas, que se extienden desde la cordillera Central sobre la margen derecha y Occidental sobre la margen izquierda, desempeñando un control litológico en las zonas donde aflora su presencia; lo cual establece un control en la sinuosidad del río.

Para el análisis comparativo de las fotografías aéreas en los años 1957, 1977, 1986 y 1998, se pudo evidenciar que un porcentaje superior al 30% del río Cauca no ha tenido cambios en su alineamiento horizontal lo que conlleva a un estado de equilibrio dinámico (CVC-Universidad del Valle, 2007).

Para el tramo de Salvajina – río Timba, el río Cauca muestra una característica típica de un río piedemonte en el tramo entre el embalse de Salvajina y la desembocadura del río Timba, descendiendo entre las cordillera Central y Occidental donde hay presencia de formaciones geológicas compuesta por cantos y bloques (CVC-Universidad del Valle, 2000a), donde los depósitos aluviales se presentan en la orillas y los controles litológicos se da por parte de la presencia de rocas duras compuestas por areniscas poco meteorizadas, estos controles se presentan aguas arriba del sector de San Francisco.

En el tramo río Timba – Hormiguero se presentan controles sobre margen derecha del cauce en la abscisa K51 + 500, donde se evidencia una gran inestabilidad de las orillas; además de varias madrevejas en las dos márgenes, que es producto de la mayor sinuosidad y movilidad del cauce en este tramo.

El sector Tablanca-Hormiguero, se caracteriza por ser la zona menos estable del río, debido a la gran movilidad horizontal del mismo, el cual posee un bajo grado de consolidación del suelo, lo que causa que el río se mueva libremente aumentando el tamaño de algunos meandros y seccionando otros.

Para el sector Hormiguero – Yumbo, la presencia de controles litológicos es mínima, la cual solo se presenta en la margen izquierda por la aparición de rocas de origen volcánico en sector puerto Isaacs. Este sector junto con el de Salvajina – La Balsa se caracterizan por ser los tramos de menor sinuosidad, además de la dirección preferencial del río hacia el Noroeste cuando su tendencia es hacia el Noreste; esto también se presenta en el tramo de Salvajina y la Virginia.

El trayecto Yumbo – Mediacanoa ha tenido cambios laterales moderados, presentando controles litológicos de manera intermitente en la margen izquierda del río por la presencia de la cordillera Occidental.

El tramo de Mediacanoa – La Virginia, presenta los controles litológicos en la margen izquierda hasta el municipio La Victoria, donde empieza a aparecer de forma intermitente en las dos márgenes, que se da por la estrechez del valle geográfico.

6.3.2 Erosión en el cauce principal

Dependiendo de la composición litológica y la posición de la orilla en el cauce del río Cauca se desarrolla diferentes grados de erosión, donde más del 60% de las curvas externas ubicadas tanto en la margen derecha como en la margen izquierda son afectadas.

Las formas meándricas del río Cauca presentan procesos erosivos, alguno de mayor intensidad que otros, lo cual ha conllevado a cambios del curso del río, a cortes de meandros rompimiento de diques, además de capturas de ríos tributarios.

Este proceso erosivo se puede asociar a la extracción desmedida de materiales del río, donde el tramo más afectado se encuentra entre el puente de La Balastrea y El Pedregal; algunas soluciones al proceso erosivo no ha contribuido al control de este proceso, tal es el caso de las tablestacas metálicas ubicadas antes del puente de La Balsa, sobre la margen derecha en el que se puede observar la acción erosiva de la corriente indicando la inestabilidad de la orilla.

Entre el sector de Pedregal y Juanchito el proceso de erosión en las curvas se puede clasificar entre moderada y leve, debido a la protección de sus orillas con tablestacas antes de la bocatoma de Puerto Mallarino.

Como consecuencia del depósito de cono aluvial por el río Yumbo, aguas abajo de su desembocadura en el río Cauca en su margen derecha se evidencia un intenso proceso erosivo; el cual se ha tratado de controlar con tablestacas.

En tramo entre el Paso de la Torre y Roldanillo la erosión se puede clasificar moderada y leve; donde se puede observar como obras de control el uso de gravillas sobre la base de los taludes, además de cultivos de pastos y caña brava.

Desde el puente Guayabal hasta el puente de La Victoria el proceso erosivo en la parte lateral en el río Cauca es mínima; donde la protección de sus orillas se lleva a cabo mediante siembra de pastos y vegetación (CVC-Universidad del Valle, 2007).

6.4 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL RÍO CAUCA

El río Cauca en su valle alto hidrológicamente es muy heterogéneo en términos de zonas, presentando un régimen bimodal de caudales, donde los periodos de alta pluviosidad se presentan los caudales altos, fenómeno que se da en los periodos abril-junio y octubre –diciembre; también se puede observar un registro de caudales medio y bajo que se presentan entre el mes de enero-marzo, además del periodo seco julio-septiembre.

Mediante las mediciones de las estaciones hidrométricas ubicadas en los tributarios en el valle alto del río Cauca, donde los ríos ubicados en la margen derecha del río Cauca aportan un caudal de 216,4m³/s, que comparando con los de la margen izquierda es mucho mayor ya que en esta franja su aporte es de 98,7m³/s. Esto se presenta porque la franja oriental que hace parte de la margen derecha, presenta mayor amplitud en comparación con la izquierda, por lo que puede tener un drenaje de mayor extensión, (esto puede ser debido a los aportes de sedimentos de la cordillera central, el cual me disminuye la pendiente y presiona el río hacia el occidente). En la Tabla 8 se presenta un resumen de los caudales característicos del río Cauca para la zona de estudio.

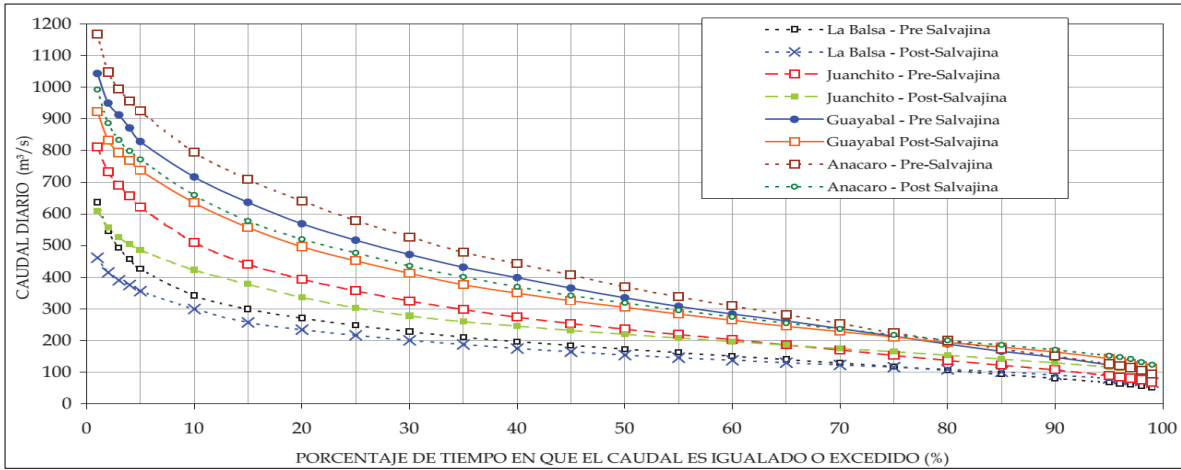
Tabla 8. Resumen de los caudales característicos del río Cauca en el tramo de estudio

Estación	Promedio de caudales máximos (m ³ /s)			Promedio de caudales mínimos (m ³ /s)			Caudales máximos instantáneos (m ³ /s)	
	Pre-Salv	Post-Salv	% Reducción	Pre-Salv	Post-Salv	% Aumento	Pre-Salvajina	Post-Salvajina
La Balsa	664	397	40	58	68	17	1360 (1966)	707 (1993)
La Bolsa	641	492	23	70	109	56	763 (1975)	666 (1993)
Hormiguero	795	597	25	78	94	21	1054 (1984)	762 (1998)
Juanchito	830	656	21	79	113	43	1074 (1971)	892 (1988)
Mediacanoa	792	672	15	96	131	36	991 (1975)	974 (1997)
Guayabal	979	721	26	115	134	16	1244 (1975)	1000 (1999)
La Victoria	1000	683	32	118	147	24	1324 (1975)	1142 (1988)
Anacaro	1057	828	22	123	153	24	1361 (1984)	1167 (1999)

6.4.1 Curvas de duración de caudales medios diarios

En las estaciones hidrométricas de La Balsa, Juanchito, Guayabal y Anacaro las curvas de duración de los caudales medios diarios para los periodos de Pre y Post Salvajina. Se aprecia que: (i) Como consecuencia de la regulación del embalse de Salvajina la curva del periodo Pre-Salvajina está por encima de la del periodo de Post-Salvajina para niveles altos, mientras que para caudales bajos ocurre el proceso inverso; (ii) La intersección de las curvas de los periodos Pre y Post Salvajina ocurre en el rango de porcentajes de tiempo cercanos al 60-76% en que

el caudal es excedido o igualado. En la Ilustración 9 se presenta el hidrograma de las estaciones.



Fuente: (CVC-Universidad del Valle, 2007-Página 97.)

Ilustración 9. Curvas de duración de caudales diarios en las estaciones más características del tramo de estudio

6.4.2 Curvas de duración de niveles medios diarios

Al comparar las curvas de duración de niveles medios diarios con la de duración de caudales se observa que su comportamiento es similar, ya que por lo general los niveles de agua altos de Pre-Salvajina son superiores a los de Post-Salvajina, pero para niveles bajos se presenta un proceso inverso. Adicionalmente las curvas de Pre y Post Salvajina se intersectan en un rango de porcentajes de tiempo cercanos al 64-77% en que el caudal es igualado o excedido. En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos en las estaciones del río Cauca para porcentajes de tiempo del 25%, 50% y 75%.

Tabla 9. Comparación de las curvas de duración de caudales y niveles diarios. Periodos Pre y Post Salvajina

Estación	Curvas de duración de caudales medios diarios						Curvas de duración de niveles medios diarios					
	% De tiempo en que los caudales diarios son igualados o excedidos						% De tiempo en que los niveles diarios son igualados o excedidos					
	Pre-Salvajina			Post-Salvajina			Pre-Salvajina			Post-Salvajina		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
La Balsa	248	173	118	217	154	116	2.34	1.96	1.68	2.18	1.89	1.70
Tablanca	257	181	117	217	156	118	1.69	1.29	0.91	1.48	1.17	0.95
La Bolsa	318	209	135	258	192	147	1.83	1.19	0.76	1.42	1.05	0.80
Hormiguero	360	237	155	303	220	165	2.64	1.80	1.27	2.26	1.71	1.34
Juanchito	357	236	153	323	231	169	3.10	2.08	1.28	2.78	2.01	1.45
Mediacanoa	456	293	181	375	262	191	4.39	3.26	2.24	3.85	3.02	2.39
Guayabal	517	335	214	452	305	212	3.68	2.42	1.47	3.19	2.17	1.46
La Victoria	533	338	213	460	310	214	4.77	3.31	2.22	4.17	3.05	2.26
Anacaro	579	370	224	477	319	218	4.17	2.90	1.88	3.49	2.55	1.87
La Virginia	720	502	328	595	460	311	3.07	2.20	1.36	2.54	1.96	1.21

Fuente: (CVC-Universidad del Valle, 2007)

7 IMPLEMENTACION DEL MODELO

El estudio se realizó mediante la aplicación de la herramienta matemática Hec-Ras 4.1, que es un sistema integrado y diseñado para un uso interactivo en ambientes multiusuarios. El sistema está compuesto de una interface gráfica para el usuario, análisis de componentes hidráulicos por separado, almacenamiento de datos y manejo de funciones, gráficos y facilidades en la generación de reportes.

7.1 TRAMO A MODELAR

El modelo se llevó a cabo en el tramo comprendido entre Balsa y la Virginia que corresponde al valle alto del río Cauca con una longitud aproximada de 420 Kilómetros; y se utilizó la información obtenida mediante la tecnología LIDAR, que tomo mediciones a partir de la estación de Salvajina, pero no fue posible iniciar el modelo desde este sector debido a que las estaciones hidrométricas ubicadas aguas arriba de La Balsa no son calibradas continuamente por la CVC y no cuentan con un amplio registro de caudales y niveles.

7.2 PERIODO A MODELAR

Para la simulación de los procesos hidrodinámicos se trabajó con el período comprendido entre julio y diciembre del año 1999, considerando que en este periodo se encontró información más completa de las estaciones hidrométricas que se localizan en el sector de estudio, ya que es de suma importancia para la implementación, calibración y verificación del modelo hidrodinámico.

7.3 MODELO HIDRODINÁMICO

Como se describió anteriormente el modelo comprendido las estaciones hidrométricas de La Balsa y La Virginia, con una longitud aproximada de 420 kilómetros. A continuación se describen las principales características del modelo.

7.3.1 Esquematización de la red de modelación

Como se indicó anteriormente, se utilizó la caracterización de la planicie aluvial mediante el levantamiento con tecnología LIDAR y un ajuste de las mediciones considerando la forma de la tierra o geoide. Pero surgieron algunos inconvenientes en cuanto al ajuste del modelo en el programa de Hec-Ras 4.1, debido a que este software solo permite por sección la introducción de 500 puntos y el vuelo LIDAR tenía aproximadamente 5000 puntos por sección, por lo que fue necesario realizar una reducción de puntos que se logró mediante la herramienta de Cross Section Points Filter de Hec-Ras, esto se llevó a cabo solo en los overbanks de cada sección.

7.3.2 Secciones transversales del río cauca

Se levantaron en total 751 secciones transversales del río Cauca en la campaña topo-batimétrica del año 2012, que fueron tomadas desde aguas abajo del embalse de Salvajina hasta la estación hidrométrica La Virginia. Para este estudio se tomó 693 secciones transversales que comprenden el sector La Balsa – Virginia, con un espaciamiento en promedio de 456 metros entre sí.

Las secciones transversales disponibles fueron examinadas detalladamente para determinar si eran representativas de la geometría del cauce en los diferentes tramos o sectores del río. Para ello se analizaron los perfiles transversales y los perfiles del fondo del río (nivel medio de fondo y nivel mínimo de fondo o thalweg).

7.3.3 Ríos tributarios

En la Tabla 10 se presentan los ríos tributarios principales modelados, cabe mencionar que los 40 ríos considerados en el modelo se esquematizaron como descargas puntuales.

Tabla 10. Localización de los ríos tributarios considerados en el modelo

TRIBUTARIOS	ABSCISA	TRIBUTARIOS	ABSCISA
Río Ovejas	K 3 + 421	Río Yotoco	K 211 + 943
Río Timba	K 24 + 493	Río Mediacanoa	K 220 + 667
Río la Teta	K 42 + 411	Río Güadalajara	K 225 + 115
Río Quinamayo	K 45 + 996	Q. San Pedro	K 262 + 549
Río Claro	K 78 + 170	Río Piedra	K 265 + 147
Río Palo	K 92 + 290	Río Riofrío	K 284 + 067
Río Jamundí	K 108 + 218	Río Tulua	K 289 + 875
Río Desbaratado	K 121 + 503	Río Morales	K 292 + 979
Río Melendez	K 127 + 724	Río Bugalagrande	K 322 + 915
Río Cali	K 146 + 534	Río Pescador	K 329 + 740
Río Arroyohondo	K 148 + 816	Río La Paila	K 331 + 078
Río Yumbo	K 164 + 240	Q. las Cañas	K 338 + 884
Quebrada Mulalo	K 165 + 514	Q. Los Micos	K 375 + 629
Río Güachal	K 166 + 000	R.U.T	K 393 + 421
Río Amaime	K 180 + 520	Q. Obando	K 414 + 813
Río Vijes	K 182 + 036	Río Chanco	K 416 + 988
Río Cerrito	K 186 + 145	Río Catarina	K 421 + 941
Río Sabaletas	K 191 + 746	Río La Vieja	K 425 + 162
Río Güabas	K 197 + 379	Río Cañaveral	K 436 + 441
Río Sonso	K 203 + 896	Río Risaralda	K 442 + 210

La abscisa K 0+000 se halla en la estación La Balsa ubicada sobre el eje del río Cauca en el departamento del Cauca.

7.4 FRONTERAS DEL MODELO

7.4.1 Frontera Superior

La frontera superior o aguas arriba del modelo se localizó en la estación hidrométrica de La Balsa, la cual se encuentra en la abscisa K 27 + 210. Para las diferentes simulaciones en esta frontera superior se introdujo, como condición hidrodinámica, la serie de caudales diarios registrados en 1999 por la CVC como se puede observar en la Figura 1.

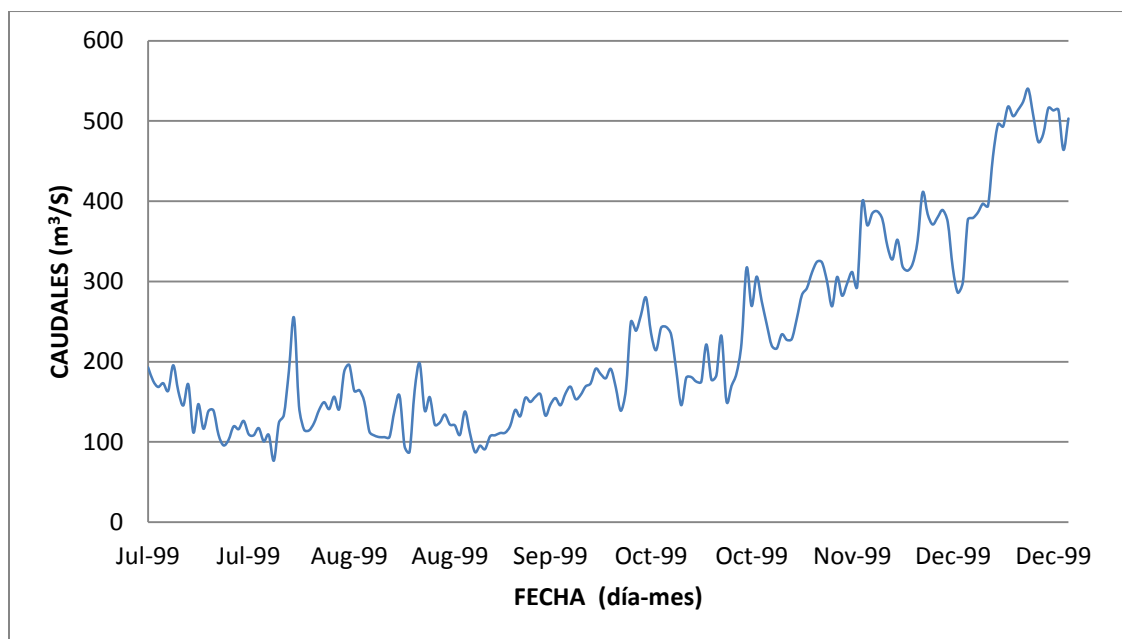


Figura 1. Serie de caudales frontera superior del modelo estación: la balsa periodo julio a diciembre del 1999

7.4.2 Fronteras internas

Para el modelo se definió como fronteras internas los ríos tributarios descritos anteriormente, para lo que se toma como información de entrada la serie de caudales diarios asociados a cada tributario que fueron ajustados con varias modelaciones. Este ajuste se realizó hasta obtener una hidrógrafa similar o muy próxima a la registrada en campo para cada estación hidrométrica, lo que permite una mejor representación del río Cauca en el modelo; para esto se tuvo en cuenta los porcentajes de aporte de los ríos tributarios al río Cauca.

7.4.3 Frontera Inferior

El límite inferior de la zona de estudio se definió en la estación hidrométrica de La Virginia (K 444+ 928). Como condición de frontera se introdujo la curva de calibración Nivel- Caudal registrada por el IDEAM, la cual se presenta en la Figura 2.

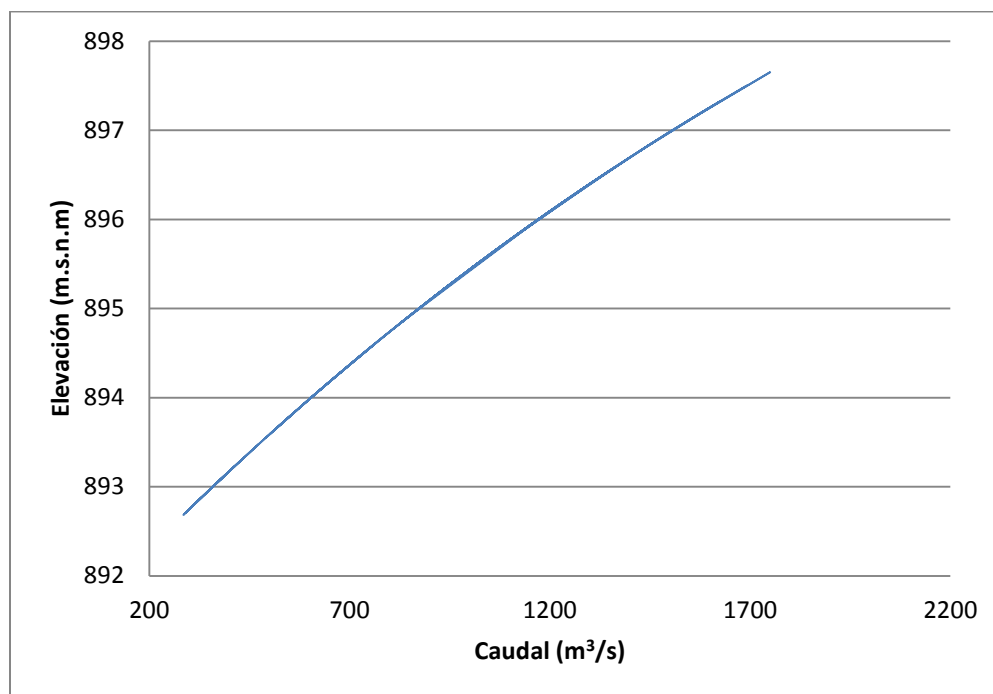


Figura 2. Curva de calibración nivel - caudal introducida en la frontera inferior modelo estación: La Virginia-Topografía 2012-Periodo: junio a diciembre 1999

7.5 MALLA COMPUTACIONAL

Se implementaron en el modelo las secciones transversales levantadas en el estudio topo-batimétrico realizado por la CVC en el año 2012 entre las estaciones de La Balsa y La Virginia, se hizo necesario ajustarlas en densidad de puntos y evitar que se cruzaran entre ellas, esto con el objetivo de garantizar una adecuada representación de la geometría del cauce.

La filtración de puntos se hizo necesaria debido al limitante del programa HEC-RAS que solo permite simular un máximo de 500 puntos por sección, este procedimiento se realizó con la herramienta de Cross Section Points Filter. La reducción de la densidad de puntos se hizo para todas las secciones transversales principalmente en las llanuras, para lo que se trató de conservar la densidad de puntos en el cauce.

7.6 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo se obtuvo a través del ajuste de diferentes parámetros numéricos y físicos que permitió alcanzar una adecuada representación del comportamiento del río Cauca. Para ello se realizó lo siguiente:

Se calibró para un periodo de verano comprendido entre los meses de Julio y Septiembre del año 1999 y se verificó para un periodo de invierno entre el mes de octubre y diciembre del mismo año.

El parámetro de la rugosidad de manning constituyó el principal parámetro de calibración, por lo cual esta se modificó (dentro de rangos físicamente aceptables) hasta lograr un ajuste razonable entre los valores de los niveles de agua medidos en campo y los obtenidos con el modelo.

Se realizó corridas en flujo no permanente, teniendo algunos inconvenientes de inestabilidad. Como se mencionó anteriormente tomando como frontera inferior la curva de calibración Nivel Caudal en la estación La Virginia, la frontera superior correspondió a un caudal constante en la estación La Balsa y las fronteras internas se tomaron como descargas constantes asociadas a los ríos tributarios. El proceso se realizó para diferentes descargas constantes con variación de la rugosidad, obteniéndose perfiles hidráulicos calculados muy similares a los perfiles hidráulicos deducidos de las curvas de calibración. En esta etapa se utilizó la herramienta flow roughness factors del modelo, esto permitió ajustar las hidrógrafas de cada estación hidrométrica.

Los coeficientes de rugosidad de Manning que permitieron alcanzar los mejores ajustes oscilan entre 0.028 y 0.0434 como se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Factores de rugosidad de Manning del río Cauca definidas durante la calibración del modelo hidrodinámico

ESTACIÓN	FACTOR DE RUGOSIDAD DE MANNING ($m^{1/3}/s$)		
	BERMA IZQUIERDA	CAUCE PRINCIPAL	BERMA DERECHA
La Balsa	0.1	0.0371	0.1
La Bolsa	0.1	0.0365	0.1
Hormiguero	0.1	0.0434	0.1
Juanchito	0.1	0.028	0.1
Mediacanoa	0.1	0.0295	0.1
Guayabal	0.1	0.0286	0.1
La Victoria	0.1	0.0276	0.1
Anacaro	0.1	0.0286	0.1
La Virginia	0.1	0.0286	0.1

Cabe mencionar que el modelo se ajustó bajo los términos (Cunge et al., 1980), donde las diferencias entre niveles de agua medidos en campo y arrojados por el modelo no deben ser mayores o inferiores a 0.50 metros, por lo que en términos generales se pudo obtener muy buenos resultados, ya que los niveles agua obtenidas por el modelo se asemejaron mucho a los medidos en campo para cada estación hidrométrica.

En las Figura 3 a 16 se presentan los resultados del proceso de calibración del modelo matemático del río Cauca, en los cuales se contrasta los niveles de agua y los caudales (medidos vs calculados) en las diferentes estaciones hidrométricas sobre el río Cauca.

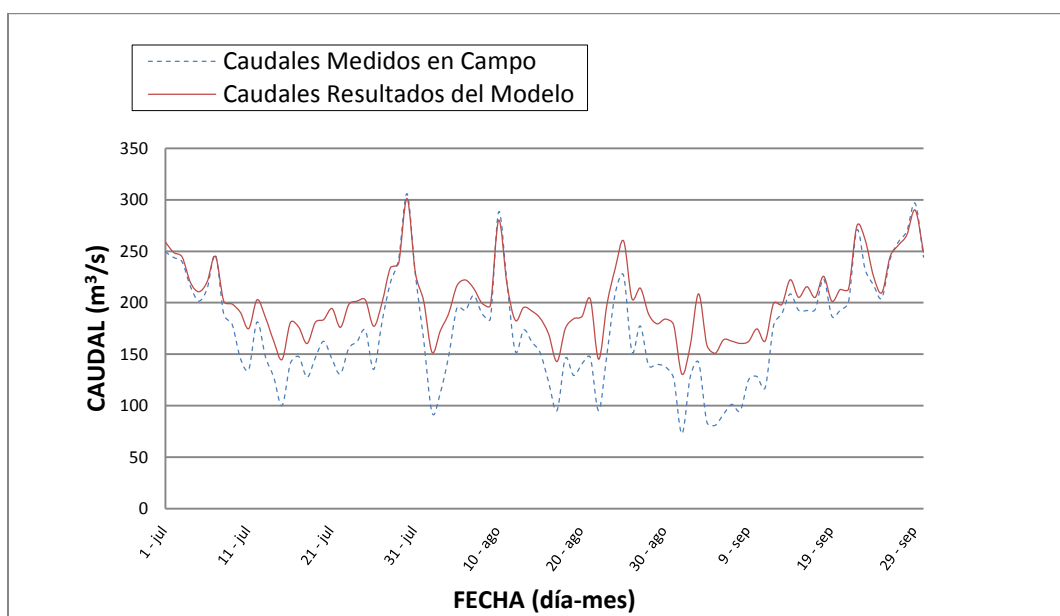


Figura 3. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Julio - Septiembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

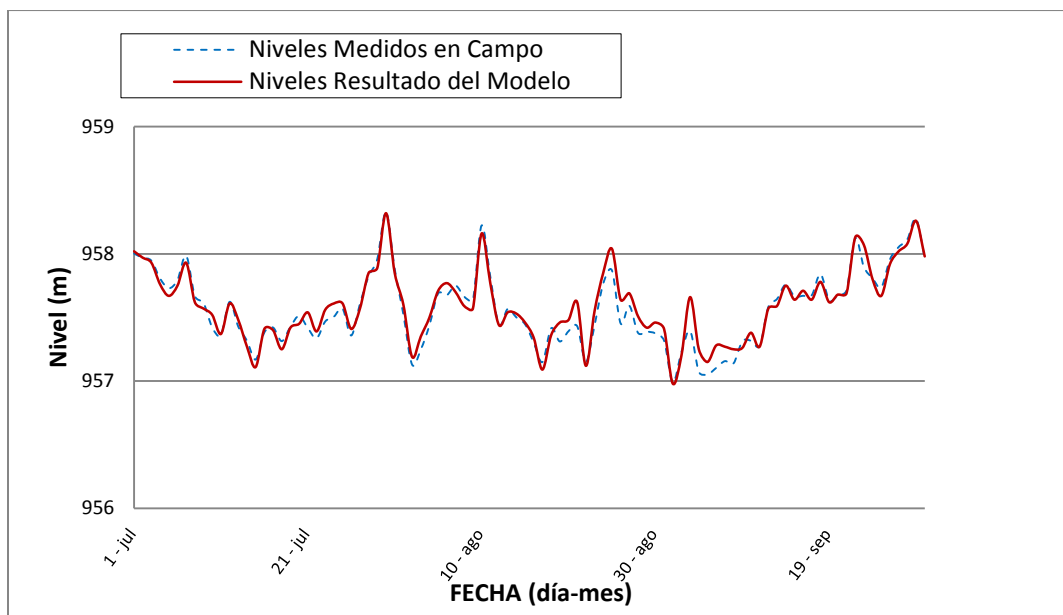


Figura 4. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa Periodo Julio – Septiembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

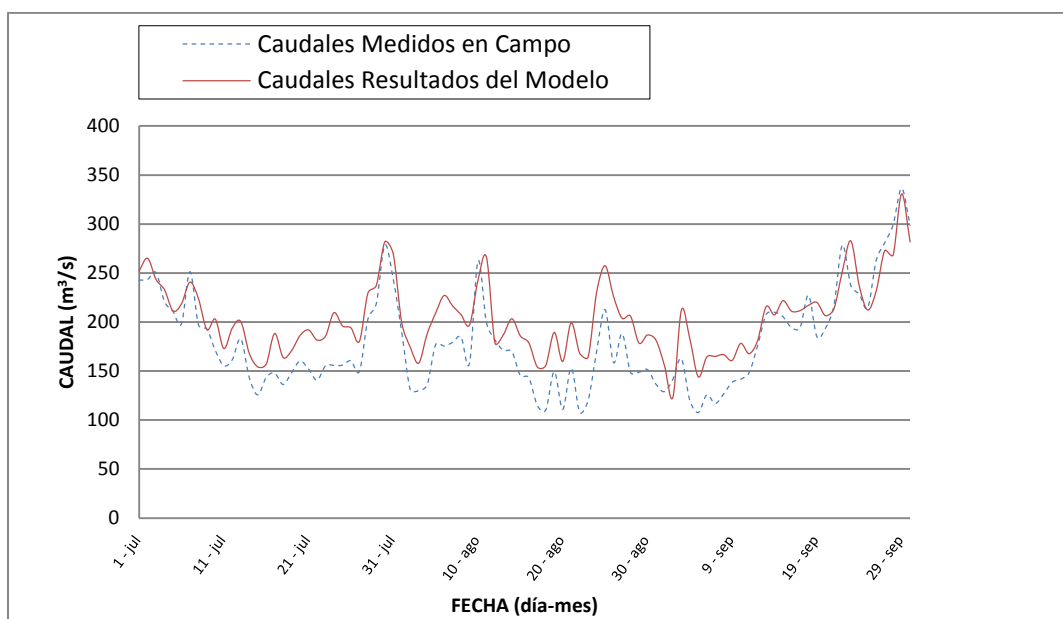


Figura 5. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Hormiguero Periodo Julio – Septiembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

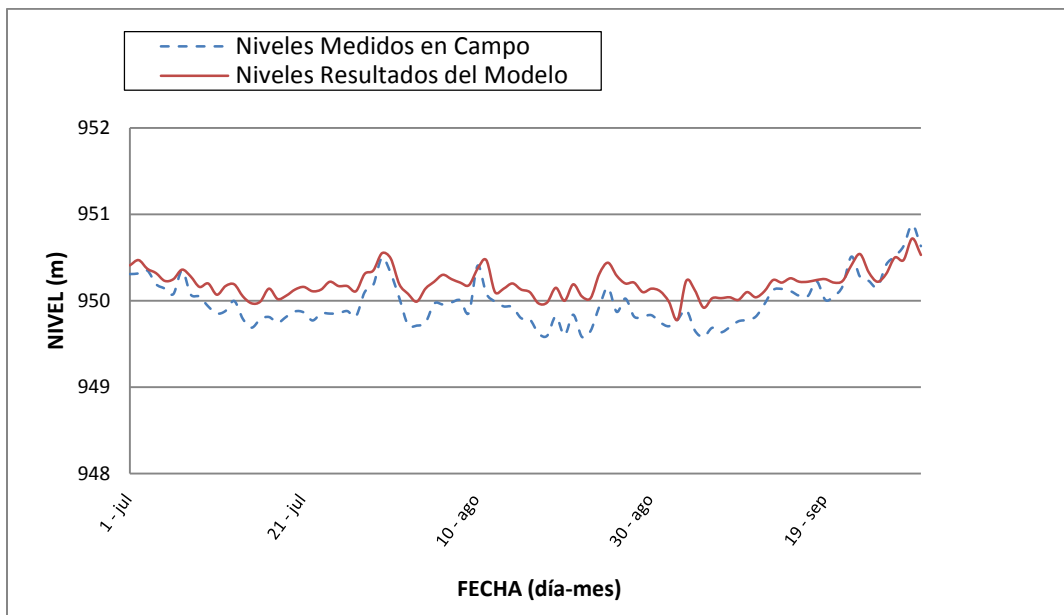


Figura 6. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Hormiguero Periodo Julio – Septiembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

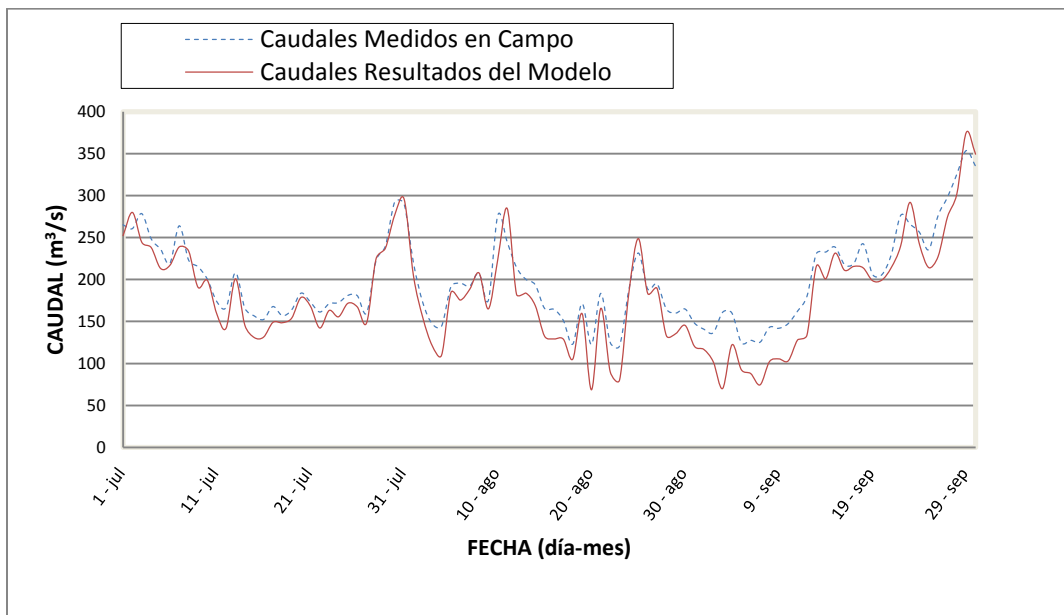


Figura 7. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Julio – Septiembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

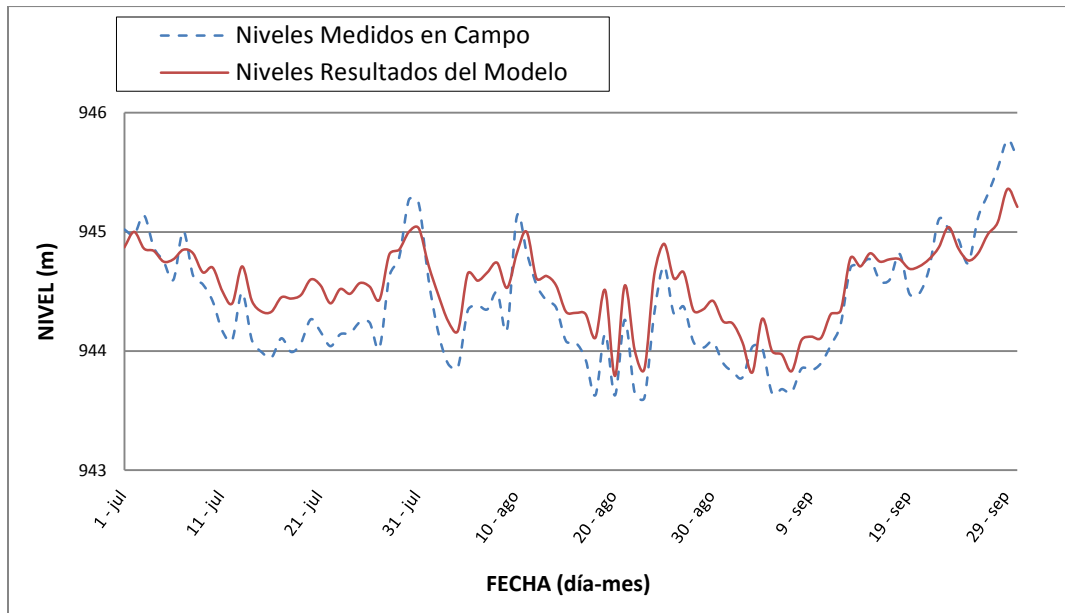


Figura 8. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Julio – Septiembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

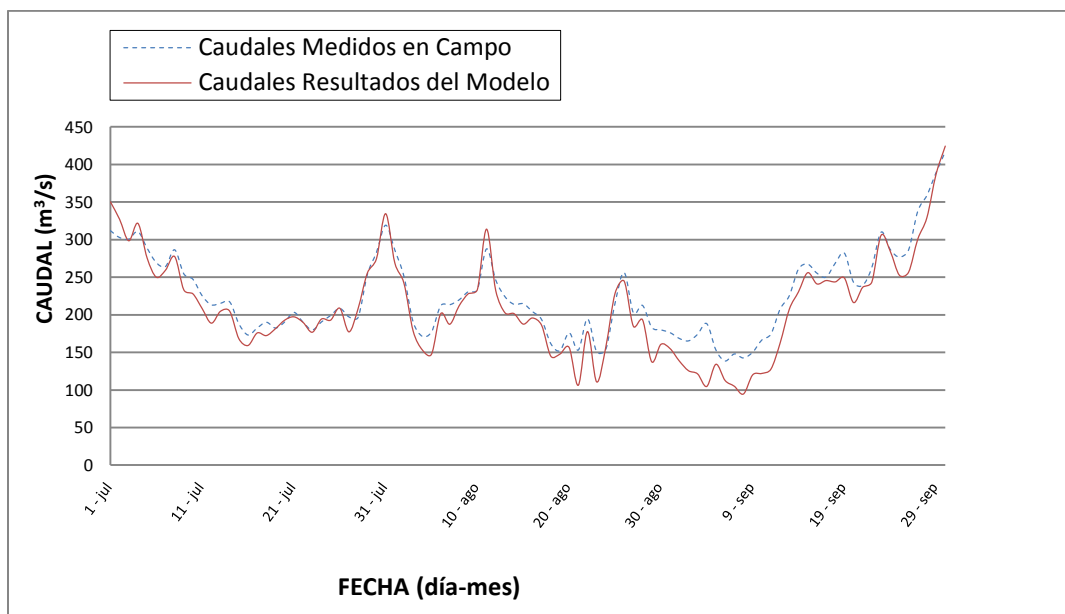


Figura 9. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Julio – Septiembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

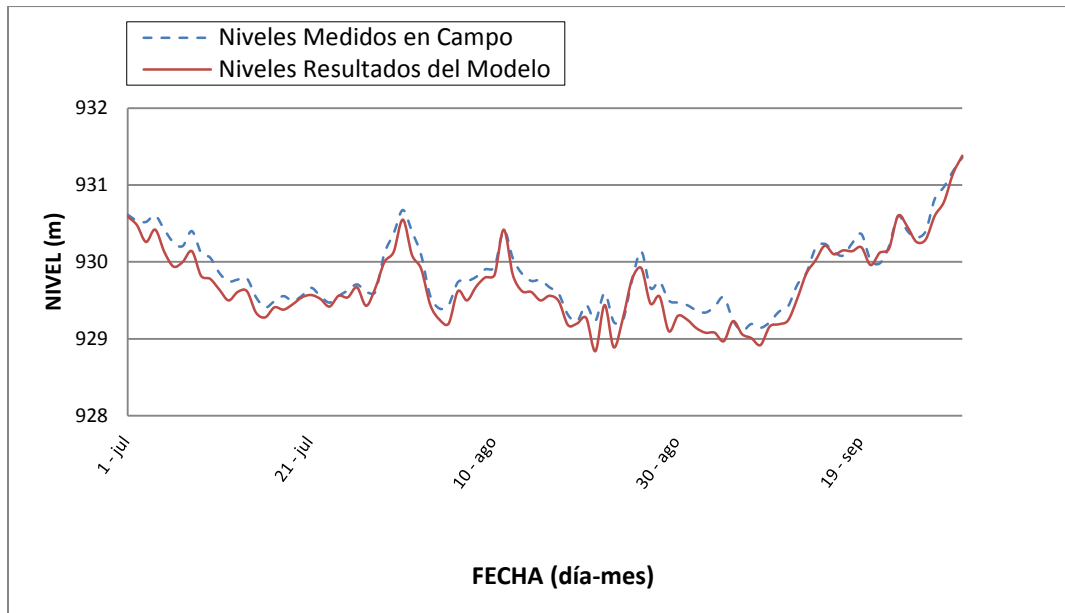


Figura 10. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa Periodo Julio – Septiembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

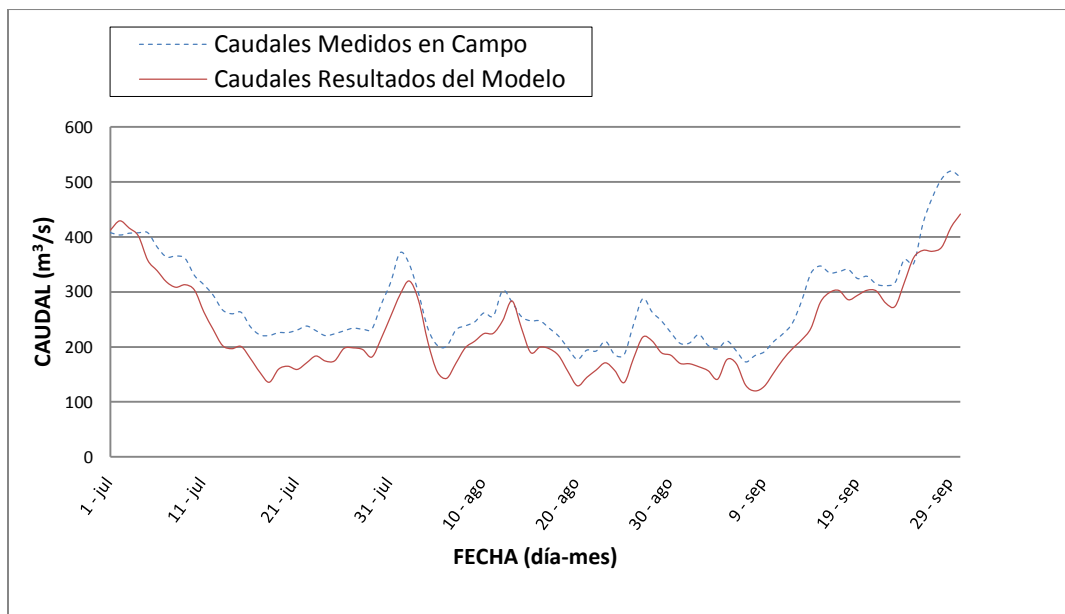


Figura 11. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal Periodo Julio – Septiembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

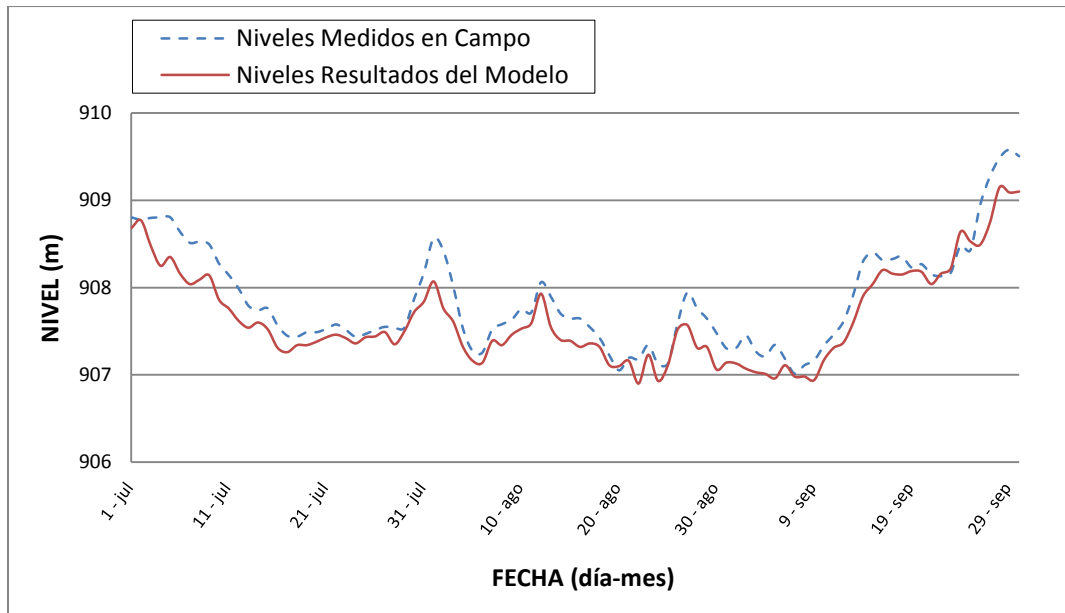


Figura 12. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal Periodo Julio– Septiembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

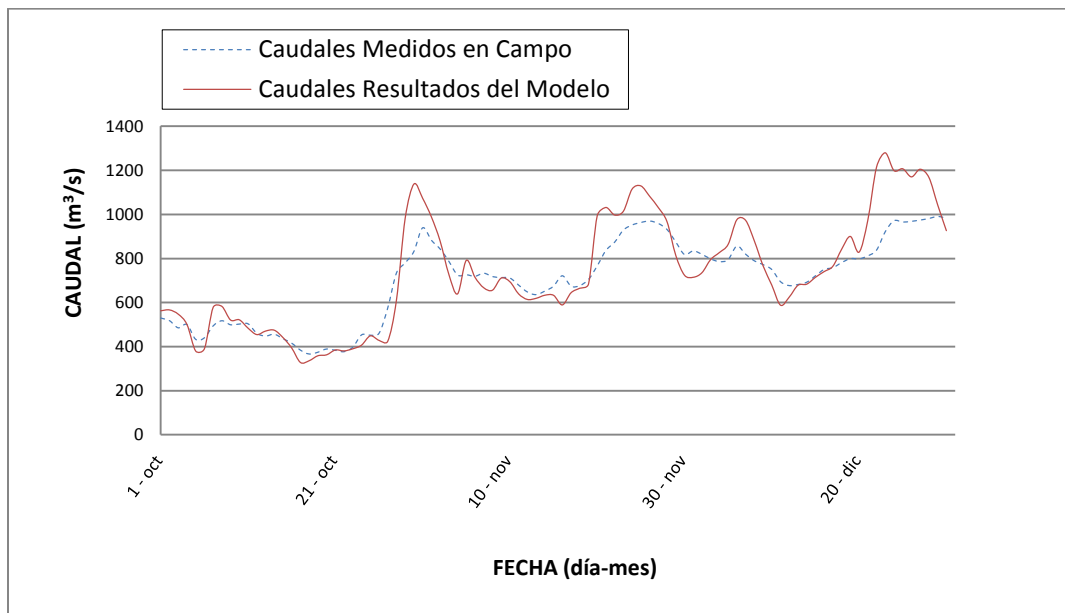


Figura 13. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Julio – Septiembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

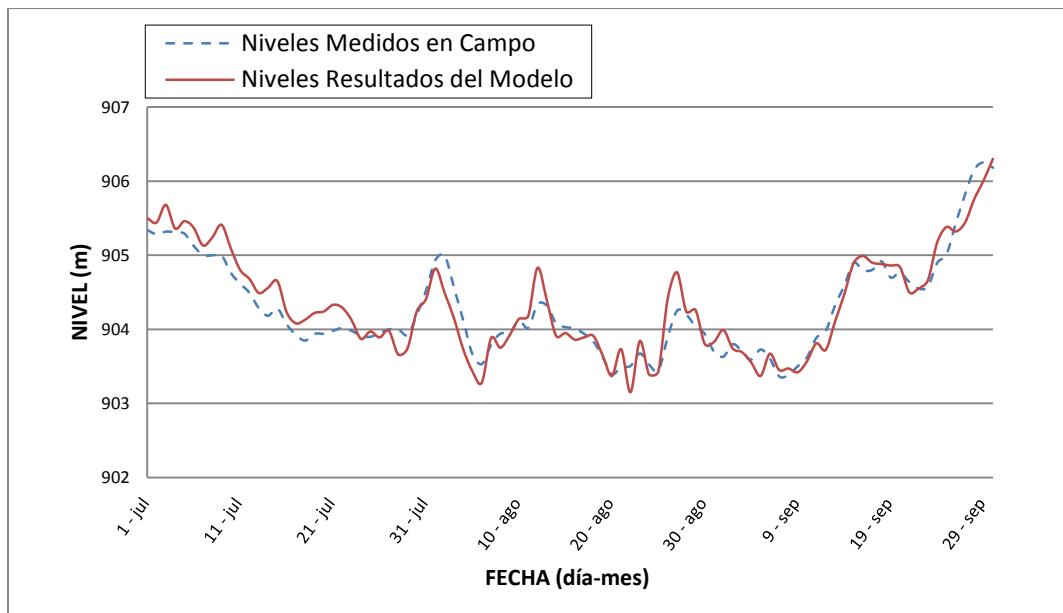


Figura 14. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Julio – Septiembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

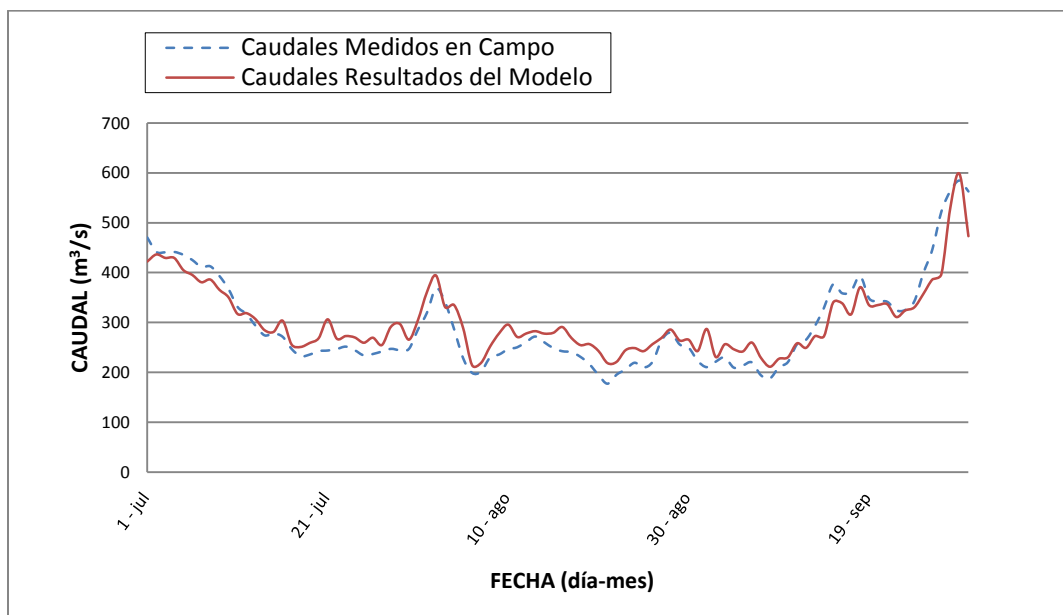


Figura 15. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Julio – Septiembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido

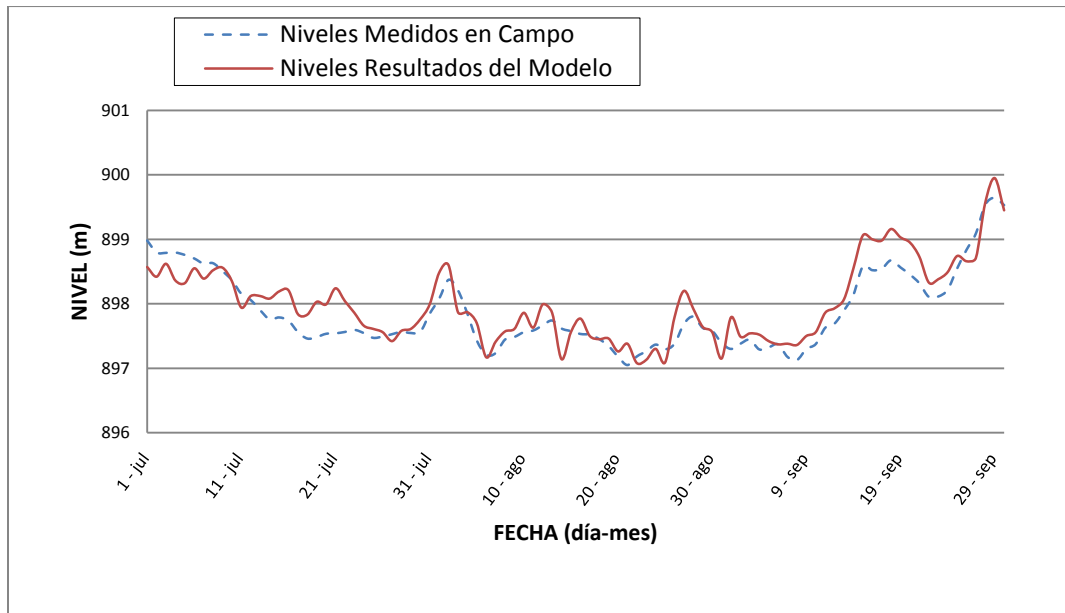


Figura 16. Calibración del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Julio – Septiembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

7.7 VERIFICACIÓN DEL MODELO

La verificación del modelo se realizó para un periodo de diferentes características al empleado en la calibración, este periodo fue el de invierno que corresponde al mes de octubre a diciembre del año 1999. En el anexo A se presentan los resultados obtenidos para la verificación del modelo en las estaciones del río Cauca.

Durante este proceso se tuvo una poca variación entre las hidrógrafas de niveles y caudales medidos en campo con los resultados arrojados por el modelo, para lo cual se ajustó la malla computacional con espaciamientos máximos entre secciones de 200 metros e intervalos de tiempo computacional de 5 minutos, en vista de que para intervalos computaciones más pequeños no se obtuvo cambios significativos en los niveles de agua, pero el tiempo computacional aumento considerablemente.

Es de suma importancia entender la exactitud e incertidumbre del modelo, por lo que existen dos tipos de sensibilidad a realizarse, las sensibilidad numérica que es el proceso de ajustar los parámetros que afectan la solución numérica para obtener la mejor solución a las ecuaciones y la sensibilidad del parámetro físico que es el proceso de ajustar los parámetros hidráulicos y las propiedades geométricas del modelo.

Por lo anterior se realizó un análisis de sensibilidad para parámetros físicos y numéricos que incluyó factores como la rugosidad del cauce, el espaciamiento máximo entre secciones ΔX y el intervalo de tiempo computacional ΔT . A continuación se presentan los resultados obtenidos.

7.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

7.8.1 Análisis de la influencia del espaciamiento máximo entre secciones

Para llevar a cabo este proceso se modificó la malla computacional, para lo que se varió los espaciamientos entre secciones transversales y dejando el intervalo de tiempo constante; a continuación se muestra los escenarios evaluados:

ΔX_{\max} de 1.000 m, 500 m, 200 m y 100 m con un intervalo de tiempo constante $\Delta T=5$ minutos

La modelación de los diferentes escenarios arrojó como resultados una mínima variación de los caudales aguas arriba del río Cauca a diferencia de las estaciones ubicadas aguas abajo, para lo que en Güayabal los caudales disminuyeron a medida que se disminuyó la distancia entre secciones; caso contrario ocurrió con las estaciones de La Victoria y Anacaro donde se incrementó el flujo a medida que se acortó la distancia entre secciones.

Para el análisis del parámetro hidráulico de velocidad se observó cambios muy tenues en las estaciones, resaltando que las diferencias más significativas se presentaron en la estaciones de Mediacanoa y el Güayabal, donde a medida que se redujo las distancias entre secciones se incrementó la velocidad.

En cuanto a los niveles se pudo denotar cambios significativos en todas las estaciones, por lo que se puede concluir que el parámetro hidráulico del nivel de agua es muy sensible al cambio de distancia entre secciones, sin embargo se observó que a medida que disminuía el espaciamiento entre secciones se reducía el zigzaguo en los caudales y niveles de agua, obteniendo la mejor representación para un espaciamiento máximo de 200 m, ya que para espaciamientos menores no había mejoras considerables en cuanto a los parámetros hidráulicos pero si un incremento en los tiempos computacionales.

En general se concluye que el parámetro hidráulico del caudal es muy poco sensible a los cambios de distancias entre secciones a diferencia de la velocidad y los niveles de agua, donde el primer parámetro tienden a aumentar a medida que se acorta la distancia de las mismas y el segundo parámetro tiende a disminuir los niveles de agua cuando se acorta la distancias entre secciones.

Los resultados obtenidos de caudales, niveles de agua y velocidades para las estaciones del río Cauca se presentan en el Anexo B.

7.8.2 Análisis de la influencia del intervalo de tiempo computacional

Para el análisis de la influencia del intervalo computacional se modeló con ($\Delta T=20$ seg, 5 min, 10 min y 30 min) con un espaciamiento máximo entre secciones de 200m.

Las diferencias en los parámetros hidráulicos fue muy tenue para los intervalos de tiempos seleccionados, aunque cabe destacar que a partir del tiempo de 5 minutos los cambios en los parámetros de caudal, velocidad y nivel de agua no fueron notorios; por lo que se puede concluir que para un espacio entre sección de 200 metros es recomendable trabajar con un periodo de tiempo de 5 minutos. Por otro lado se pudo observar que para tiempos menores del recomendado el periodo computacional era mucho mayor. En el Anexo C se presenta los resultados obtenidos para las estaciones del río Cauca.

7.8.3 Análisis de la influencia de la rugosidad del cauce

Como parte del análisis de sensibilidad del modelo, también se evaluó la influencia de la rugosidad del cauce en la hidrodinámica del río Cauca. Para ello se realizaron diferentes simulaciones considerando distintos coeficientes de rugosidad de Manning.

Como resultado se pudo observar que la variación de la rugosidad tiene una gran influencia en los parámetros hidráulicos como son la velocidad y en los niveles de agua en las estaciones hidrométricas del río Cauca, por lo anterior se puede concluir que el modelo es muy sensible al factor de rugosidad. Los resultados para las estaciones del río Cauca se observan en el Anexo D.

8 PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES MEDIDAS ESTRUCTURALES PARA LA GESTIÓN DE INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA

Para la realización de la modelación matemática de las alternativas propuestas estructurales para la gestión de inundaciones en el valle alto del río Cauca, se tomó como base el modelo matemático implementado en el capítulo anterior. Sobre el modelo base se realizó modificaciones respecto a la rugosidad empleada en la berma comprendida entre la banca llena y la pata del dique, y las condiciones hidrodinámicas de fronteras del río Cauca y los ríos tributarios.

Se evaluó la influencia que ejerce la relocalización de diques en la función de laminar de las crecientes, para lo cual se ubicaron diques a 60 m, 150 m y 200 m respectivamente sobre las llanuras del río Cauca en la zona de estudio.

A continuación se describen los parámetros utilizados para evaluar las diferentes alternativas implementadas en el modelo HEC-RAS, las cuales consisten en: Diques marginales ubicados a 60 m, 150 m y 200 m del cauce principal. Para la formulación de estas alternativas se respetaron los lineamientos establecidos en el acuerdo 052 de 2011 expedido por la CVC.

8.1 RUGOSIDAD

Los factores de rugosidad del cauce principal del río Cauca y los ríos tributarios adoptados para el estudio de las alternativas estructurales propuestas corresponden a los factores de rugosidad de Manning-Strickler, obtenidos en la calibración del modelo presentado en el capítulo anterior. En la Tabla 11 se presentan los valores de la rugosidad de los cauces en términos del coeficiente de rugosidad de Manning. Debido a la limitada información de campo disponible en cuanto a aforos líquidos durante las condiciones de caudales y niveles altos en el río no fue posible realizar una calibración apropiada de los factores de rugosidad en las bermas, por lo cual se adoptó un factor de rugosidad de Manning para éstas igual a $0.1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, tomado de los estudios realizados por la CVC y la Universidad del Valle en desarrollo del proyecto de modelación del río Cauca de los estudios de la PMC (CVC-UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2007)

8.2 HIDRÓGRAFAS DE CAUDALES

Fue necesario estimar los caudales máximos o picos en las estaciones para un periodo de retorno de 30 años con el objetivo de implementar la modelación hidrodinámica del río Cauca. Los caudales picos en las estaciones del tramo La Balsa - Juanchito fueron estimados a partir de los registros disponibles de las series de caudales máximos del período Post-Salvajina, es decir, después del año 1985, debido a la influencia marcada del embalse de Salvajina sobre los caudales

hasta la estación Juanchito. Para las demás estaciones hidrométricas se tomaron las series completas de caudales máximos disponibles durante todo el periodo de operación de las estaciones. (es decir, las series incluyen los registros de los periodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina). Los caudales máximos estimados para una creciente en el río Cauca con un periodo de retorno de 30 años fueron obtenidos del estudio de (zonificación de amenazas por inundaciones del río cauca en su valle alto y planteamiento de opciones de protección) realizado por la Universidad del Valle, en la Tabla 12 se presenta los caudales estimados.

Tabla 12. Caudales máximos estimados para las estaciones hidrométricas del río Cauca para una creciente con un periodo de retorno de 30 años

Río	Estación	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)
		Tr = 30 años
Cauca	La Balsa	656
	La Bolsa	804
	Hormiguero	875
	Juanchito	1172
	Mediacanoa	1189
	Guayabal	1265
	La Victoria	1272
	Anacaro	1350
	La Virginia	1893

Después de definir los caudales picos en las estaciones hidrométricas del río Cauca para un periodo de retorno de 30 años fue necesario definir las hidrógrafas de caudales que se debían ingresar en las fronteras abiertas superiores del modelo matemático, tanto en el río Cauca sobre la estación La Balsa como en los ríos tributarios.

Para ello se seleccionaron las hidrógrafas de caudales registradas durante el período noviembre - diciembre de 2011, por corresponder a una de las crecientes más intensas registradas en el valle alto del río Cauca. Se seleccionó el periodo más crítico de esta creciente, que presentó una duración de 22 días. Para obtener las hidrógrafas de caudales se realizaron los siguientes procedimientos:

- Se adimensionalizaron las hidrógrafas al dividir cada caudal registrado en la creciente entre el caudal pico de la misma.

- Luego los resultados adimensionales obtenidos se multiplicaron por el caudal máximo estimado para la creciente de período de retorno de 30 años.

En la Tabla 13 se presentan los caudales máximos estimados para un periodo de retorno de 30 años en los ríos tributarios del río Cauca, al igual que el caudal en la estación la Balsa, localizado sobre el eje del río Cauca.

Tabla 13. Caudales Máximos estimados en las Fronteras del Modelo Hidrodinámico para un periodo de retorno de 30 años.

Frontera	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)
	Periodo de Retorno 30 años
La Balsa (Río Cauca)	654.8
Río Quinamayo	12.37
Río Teta	11.02
Río Claro	106
Río Palo	240
Río Jamundí	164
Río Desbaratado	87.17
Río Cali	6.99
Río Arroyohondo	10.5
Río Yumbo	9.54
Río Guachal	109
Río Amaime	117
Río Zabaletas	4.16
Río Guabas	19
Río Sonso	11.09
Río Yotoco	2
Río Mediacanoa	10.4
Río Guadalajara	184

Frontera	Caudales Máximos Estimados (m ³ /s)
	Periodo de Retorno 30 años
Quebrada San Pedro	1.6
Río Piedras	12.06
Río Riofrio	63.6
Río Tuluá	261
Río Morales	46.1
Quebrada Robledo	6.41
Río Bugalagrande	148.9
Río Pescador	11.25
Río Paila	311.9
Quebrada Las Cañas	19.6
Quebrada Los Micos	87.13
R.U.T	42.4
Río Obando	50.12
Río Chanco	6.18
Río Catarina	81.97
Río La Vieja	694
Río Risaralda	293

8.3 ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES CONSIDERADAS PARA EL MODELO

Para la esquematización de las alternativas que consideran como medida estructural sólo diques localizados a 60 m, 150 m y 200 m del cauce principal del río Cauca se construyeron tres archivos diferentes, los cuales contienen la topografía. En las secciones topográficas ingresadas al modelo se modificaron las distancias de los diques al cauce principal, adoptando anchos de berma de 60, 150 y 200 m, respectivamente, para cada uno de los modelos construidos.

Para la relocalización de los diques se consideró la no existencia de medidas estructurales en el modelo, con el fin de estimar la extensión de las áreas que se inundarían, en el caso de ocurrir una creciente con un periodo de 30 años. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 17.

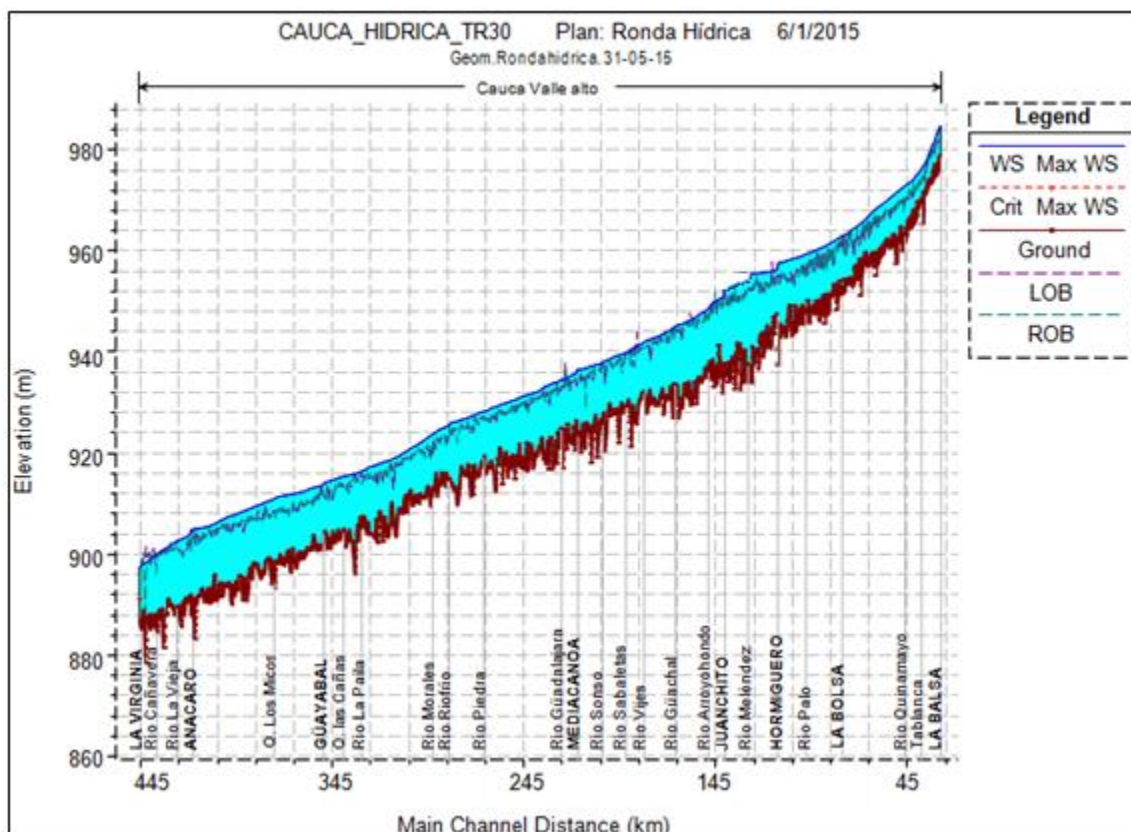


Figura 17. Niveles de agua en el Río Cauca sin alternativas estructurales de protección para un TR=30 años Tramo: La Balsa – La Virginia

El análisis de la información consignada en la gráfica, permite concluir lo siguiente:

- En la modelación del río Cauca sin considerar alternativas estructurales de protección contra inundaciones para un periodo de retorno de 30 años, se

tiene que la creciente simulada sobrepasa la mayor parte el nivel de banca llena en el río Cauca.

- Si se comparan los niveles arrojados en la simulación de escenarios como (modelación del río Cauca sin alternativas estructurales de protección para un periodo de retorno de 30 años vs modelación del río Cauca con alternativas estructurales de protección como diques distanciados a 60m, 150m, 200m para un periodo de retorno de 30 años) se puede observar que los niveles de agua cuando existen diques son superiores debido a que la lámina de agua se incrementa cuando más cerca están los diques del cauce.
- En el tramo de la estación Hormiguero y Juanchito se observan los mayores niveles de desbordamiento, lo que podría deberse a las condiciones topográficas del lugar. En la estación de Juanchito el nivel de la creciente simulada supera el de banca llena por aproximadamente 0.70 metros de diferencia, mientras que en el hormiguero es de 1.18m.
- En términos generales se ha encontrado que las medidas estructurales adoptadas a lo largo del Valle Alto del río Cauca, han permitido mitigar el impacto de las crecientes, pero se hace necesario recuperar las zonas ribereñas de las márgenes del río Cauca ya que ayudarían en gran medida a la disminución de los desbordamientos del río Cauca.

A continuación se presentan los diferentes resultados obtenidos de las simulaciones de la relocalización de los diques marginales en el río Cauca, al igual que los análisis correspondientes.

8.4 RELOCALIZACIÓN DE DIQUES

Con el fin de estimar, en primera instancia, la influencia de la ubicación de los diques marginales de protección del río Cauca en la función de laminar las crecientes, es decir, de reducir los niveles de agua, se simularon tres alternativas diferentes considerando los diques distanciados 60m, 150m y 200m del cauce principal del río Cauca. Para ello se considera en el modelo matemático el cauce del río como una sección compuesta por la sección principal del cauce más las bermas izquierda y derecha hasta los diques, donde las longitudes de bermas en la planicie son 60 m, 150 m y 200 m, respectivamente.

En las siguientes figuras 18, 19 y 20 se observa la sección transversal con los distanciamientos de los diques para la estación de La Balsa.

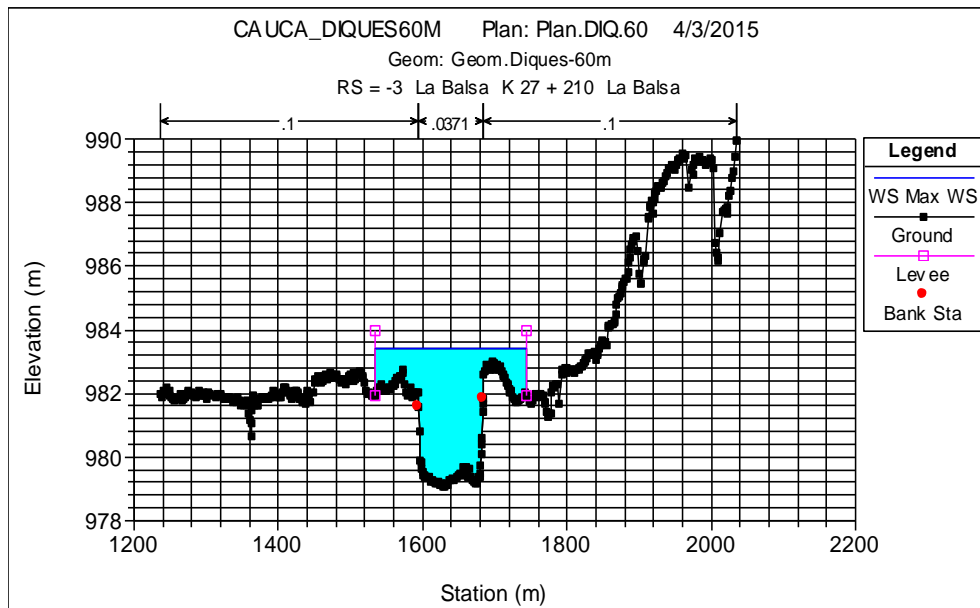


Figura 18. Diques distanciados a 60 metros, estación La Balsa

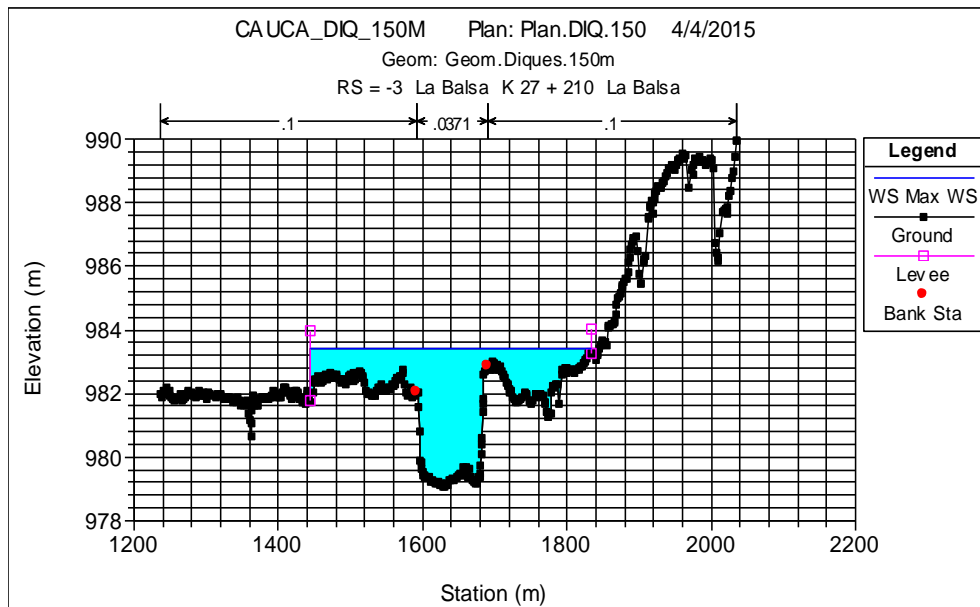


Figura 19. Diques distanciados a 150 metros, estación La Balsa

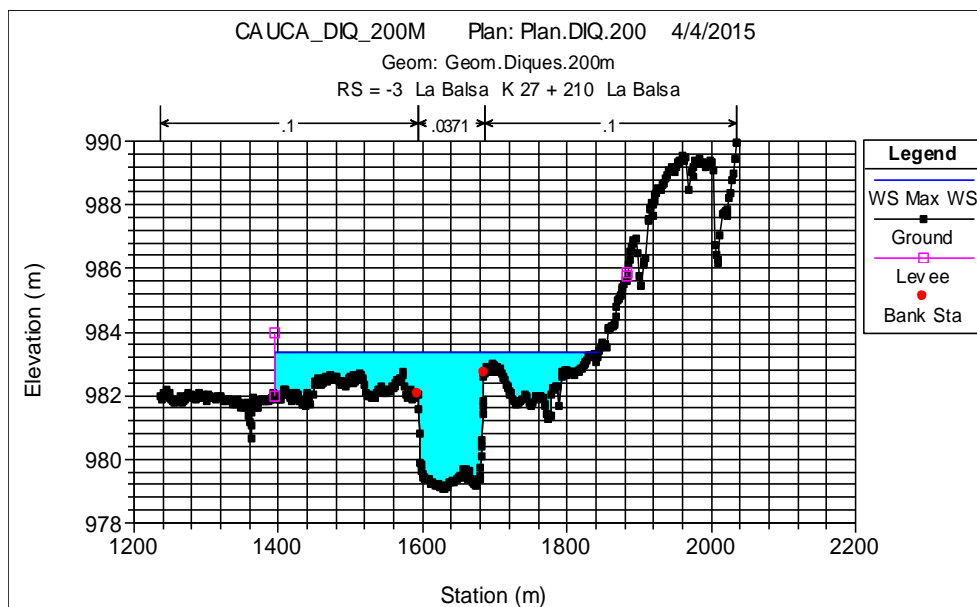


Figura 20. Diques distanciados a 200 metros, estación La Balsa

En la Tabla 14 se presentan los niveles de agua máximos obtenidos para las diferentes localizaciones de los diques de protección para un periodo de retorno de 30 años.

Tabla 14. Niveles de agua máximos en el río Cauca simulados para diferentes localizaciones de los diques marginales de protección
Periodo de Retorno: 30 años

Estación	Nivel de banca llena	Nivel de agua máximo en el río (msnm)		
		Dique a 60m	Dique a 150m	Dique a 200m
La Balsa	983.1	985.38	984.97	984.8
La Bolsa	962.18	963.43	962.98	962.82
Hormiguero	954.83	958.04	957.45	957.26
Juanchito	952.16	953.34	953	952.73
Mediacanoa	934.45	937.35	936.84	936.6
Guayabal	912.35	915.03	914.59	914.4
La Victoria	909.81	912.25	912.02	911.86
Anacaro	903.287	904.88	904.48	904.4
La Virginia	897.75	897.43	897.42	897.41

En la Tabla 15 se presentan las diferencias de niveles de agua máximos obtenidas para las diferentes localizaciones de los diques de protección para un periodo de retorno de 30 años.

**Tabla 15. Niveles de agua máximos en el río Cauca simulados para diferentes localizaciones de los diques marginales de protección
Periodo de Retorno: 30 años**

Estación	Nivel de banca llena	ΔH (metros)		
		Dique a 60-150	Dique a 60-200	Dique a 150-200
La Balsa	983.1	0.41	0.58	0.17
La Bolsa	962.18	0.45	0.61	0.16
Hormiguero	954.83	0.59	0.78	0.19
Juanchito	952.16	0.34	0.61	0.27
Mediacanoa	934.45	0.51	0.75	0.24
Guayabal	912.35	0.44	0.63	0.19
La Victoria	909.81	0.23	0.39	0.16
Anacaro	903.287	0.4	0.48	0.08
La Virginia	897.75	0.01	0.02	0.01

En la Figura 21 se muestran los resultados de niveles obtenidos al relocalizar los diques.

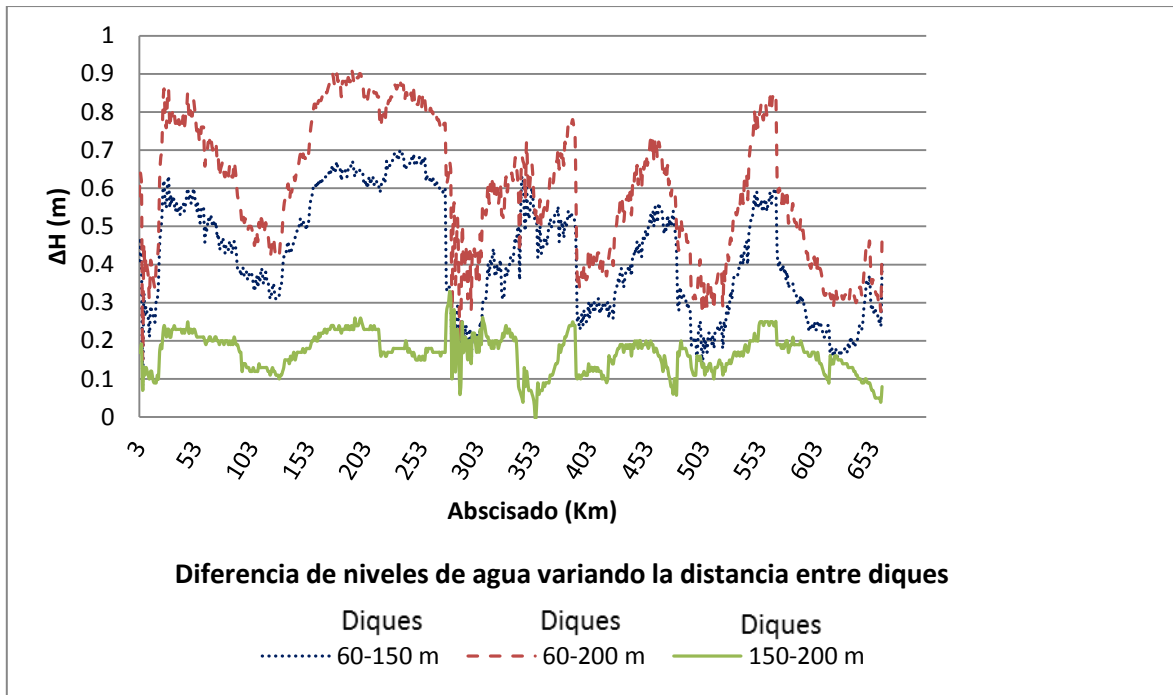


Figura 21. Disminución de los niveles de agua máximos en el río Cauca comparando diferentes alternativas para la gestión de inundaciones.

En la figura anterior se puede observar la disminución de los niveles de agua máximos esperados en el río Cauca al modelar los diques marginales distanciados a 60m, 150m y 200 m, teniendo que destacar los siguientes aspectos:

- La relocalización de los diques marginales y el consecuente aumento de la berma ejercen un efecto significativo en la disminución de los niveles de agua máximos en el río Cauca, sector La Balsa – Virginia. Esto es, en la medida en que los diques se encuentren más distanciados del cauce principal del río Cauca, los niveles de agua tenderán a ser más bajos.
- En general, al relocalizar los diques marginales que originalmente estaban a 60 m del cauce principal y aumentar el ancho de berma a 150 m los niveles de agua tienden a reducirse alrededor de 42.3 cm, mientras que si se reubican de 60 m a 200 m se tiene una diferencia en promedio de los niveles de 58.4 cm, de igual forma la altura de la lámina de agua disminuye a 16.5 cm al reubicar los diques desde 150 m a 200 m. Sin embargo, es importante anotar que a lo largo del río no se presenta una disminución constante en los niveles de agua, debido a que en los ríos aluviales como el río Cauca las configuraciones morfológicas pueden cambiar mucho al pasar de un sector a otro.
- Al comparar los niveles obtenidos al distanciar los diques marginales a 150 m y 200 m del cauce principal, con respecto a los niveles obtenidos al localizar los diques a 60 m, se observa que en la estación La Balsa los niveles de agua se reducen en 61 cm y 16 cm; mientras que en la estación de Mediacanoa (la

reducción comparativa de niveles es del orden de 75 cm y 24 cm, respectivamente; en tanto que en la estación de Anacaro los niveles se reducen aproximadamente en 48 cm a 8 cm respectivamente.

Por consiguiente, es recomendable ubicar los diques marginales lo suficientemente alejados del cauce principal, ya que además de disminuir el riesgo potencial de posibles inundaciones a causa de rupturas por sobrepresiones en las estructuras debido altos niveles de aguas, se contribuye a que la planicie adyacente o llanura aluvial cumpla con sus funciones hidrológicas, geomorfológicas y eco sistémicas, como de controlar naturalmente las crecientes, además de servir de soporte para la especies autóctonas, sin olvidar la recarga de los acuíferos subterráneos facilitando la regulación natural de caudales, entre otras.

Aunque la reducción de los niveles obtenidas en la modelación al relocalizar los diques a varias distancias no sea de gran magnitud en algunas zonas, se puede decir que por más pequeña que sea la disminución esto puede marcar la diferencia en que falle o no falle un dique por las altas sobrecargas.

A mayor distanciamiento de los diques se puede evidenciar que al presentarse el desbordamiento del río Cauca, las planicies de inundación actúan como áreas de almacenamiento, lo que provoca una disminución en los caudales que circulan por el canal principal aguas abajo; además de bajar las velocidades en el cauce.

Por lo tanto al minimizar estos desbordamientos con diques a una distancia corta, se disminuye el almacenamiento que se efectúa en la llanura de inundación, lo que implica que por el cauce principal circulen mayores caudales que por lo consiguiente se traduce en mayores niveles de agua.

Con las medidas de protección contra inundaciones, para este caso los diques distanciados a 150 y 200 metros contribuirían en la restauración de las riberas, beneficiando el restablecimiento de los procesos naturales y con ello la mejora ecológica en las llanuras de inundación en el valle alto del río Cauca.

Realizando una comparación de los niveles de agua obtenidos para el río Cauca con estructuras y sin estructuras para un periodo de retorno de 30 se obtiene una diferencia en cuanto a la disminución de los niveles máximos esperados de agua, para lo cual se tiene un promedio de 0.84 metros para los niveles reportados para diques distanciados a 60 metros con respecto a los niveles obtenidos sin estructuras. Para los diques distanciados a 150 metros y 200 metros con respecto a los niveles sin estructura se tiene un promedio de disminución de agua en 0.42 metros y 0.22 metros respectivamente.

Por lo anterior se puede evidenciar como los diques marginales incrementan los niveles de agua en el cauce. En la Figura 22 se presenta dichas diferencias.

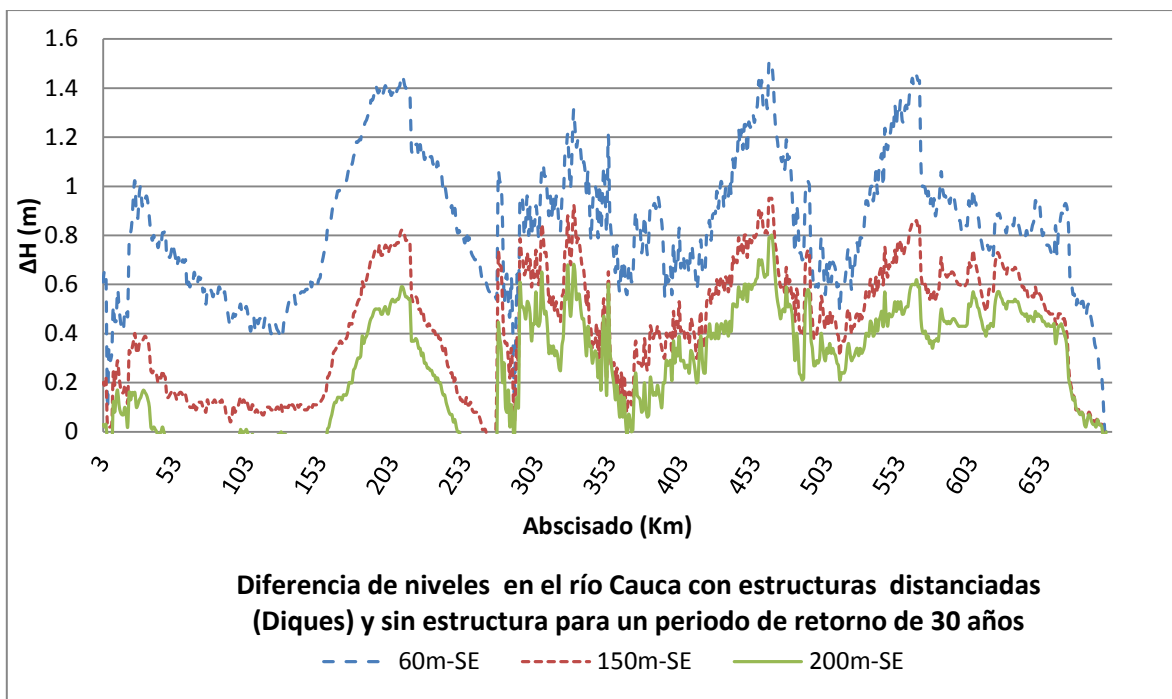


Figura 22. Disminución de los niveles de agua máximos en el río Cauca con estructuras (diques distanciados) y sin estructuras.

Por todo lo anterior se puede concluir que el comportamiento de las inundaciones en el valle alto del río Cauca determina los procesos: ecológicos, de suelos, la flora, la fauna y el uso de la tierra en las llanuras de inundación, los cuales conforman conjuntos que involucran varios ecosistemas, en los que hay ambientes acuáticos permanentes, temporales y sabana de tierra firme; por lo cual radica el nivel de importancia de poder recuperar estas zonas que a través de los tiempos han sido ocupadas por el ser humano.

8.5 LAGUNAS DE LAMINACIÓN DE CRECIENTES

Las lagunas de laminación son almacenamientos temporales de agua en zonas de expansión adecuadas que traen beneficios a la red hidrográfica ubicada aguas abajo de las mismas. Estas forman parte de las intervenciones estructurales activas para la mitigación del riesgo hidráulico que modifican el hidrograma de crecida disminuyendo el caudal pico. Sin embargo, son obras que se deben implementar con mucho cuidado debido al gran impacto, tanto hidrológico como ambiental, que generan en la cuenca durante y después de su construcción. Adicionalmente, requieren la disponibilidad de porciones extensas de territorio, e implican el diseño y construcción de un conjunto de diferentes obras que requieren, a su vez, la disponibilidad de recursos.

Con respecto a su funcionamiento hidráulico, las lagunas de laminación se dividen en dos tipos: lagunas de derivación y lagunas en línea (ver figura 23)

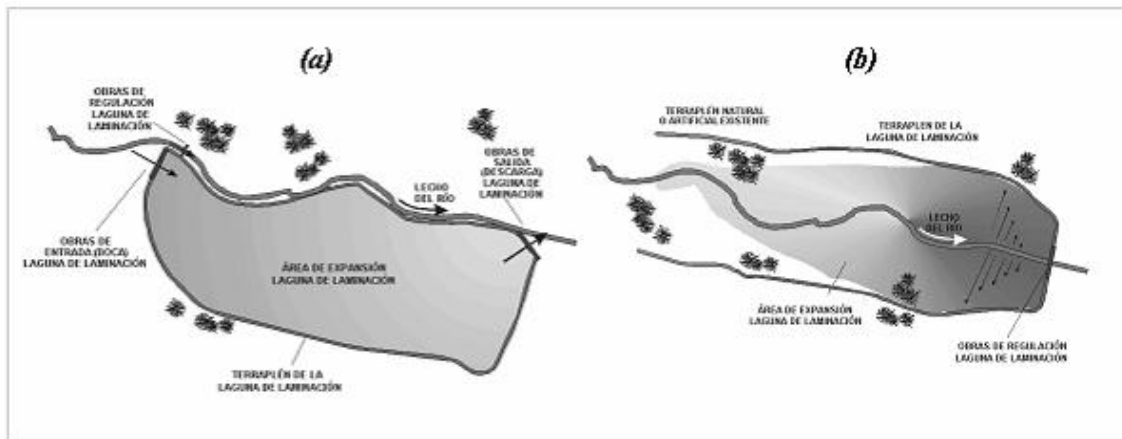


Figura 23. Laguna de laminación (a) Fuera de línea y (b) En línea

8.6 EMBALSES DE REGULACIÓN DE CRECIENTES

Se define el embalse como un reservorio o lago artificial construido en un río para almacenar agua y que tiene como propósito la regulación estacional, anual o multianual, de los caudales naturales de un río.

Todo embalse consta de las siguientes estructuras básicas: la presa, el aliviadero y las obras de toma.

- La presa, dique o represa, es la estructura de retención de las aguas y resiste un empuje. Puede ser una presa frontal o una presa de derivación hacia una depresión natural.
- El aliviadero o estructura de alivio o descarga de los excesos que llegan al embalse, los cuales no se desean almacenar. Su característica más importante es la de evacuar con facilidad las máximas crecientes que llegan al vaso de almacenamiento. Su insuficiencia provoca el desborde del agua por encima de la cresta de la presa y el posible colapso de esta estructura sobre todo si se trata de una presa de tierra o enrocado.
- Las obras de toma son un conjunto de estructuras formadas por una entrada o toma, un túnel o conducto a través de un estribo o de la presa y una estructura de salida. Este conjunto permite tomar las aguas del embalse y pasarlas al canal principal. Debe tener suficiente capacidad para descargar las aguas, abastecer las demandas dispuestas para la operación del embalse, de acuerdo a los requerimientos para niveles mínimos del mismo.

Para dimensionar el embalse se debe de tener un estudio hidrológico, topográfico y geológico. El dimensionamiento hidrológico de la presa que incluye fundamentalmente: altura de la presa y capacidad del vertedero de control de crecientes.

El dimensionado hidrológico de un embalse involucra buena parte de los estudios hidrológicos, entre ellos estimar el hidrograma del ingreso y salida del embalse, definido por $Q_i(t)$ y $Q_o(t)$, las variaciones en el volumen almacenado en el embalse dV/dt se representan por la ecuación:

$$Q_i(t) - Q_o(t) = \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec. 4}$$

Con la ecuación (4) se puede interpretar que el caudal de salida es inferior o igual al de entrada, de esta manera el embalse se puede llenar progresivamente, hasta un tiempo después del cual se invierte la situación y este comienza a vaciarse. El área comprendida entre los hidrogramas en el intervalo de tiempo definido es igual al volumen total almacenado (ver Figura 24).

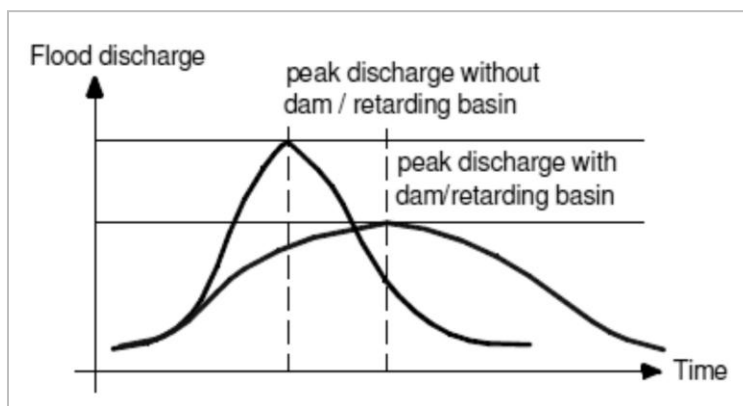


Figura 24. Hidrógrafa de reducción del pico de descarga

Fuente: JICA (2002)

9 MAPA DE INUNDACION EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA

Los mapas de inundación indican la extensión y localización de las áreas que resultan inundadas al presentarse desbordamientos como consecuencias de lluvias intensas y prolongadas, tiempos de retorno seleccionados. Para la generación de estos mapas se debe contar con la topografía de las zonas para analizar, además de realizar una modelación matemática con el fin de determinar la extensión de las áreas inundadas y la magnitud de la inundación en términos de los niveles de agua. (Ríccardi, 1997; Ramírez *et al.*, 2002; Ribera, 2004). A partir de estos mapas es posible obtener la variación de los niveles de agua a lo largo del área inundada (CVC, 2007)

Con base en los resultados de la modelación matemática hidráulica se generaron los mapas de inundación para diferentes crecientes. Estos mapas suministran la información sobre las características hidrodinámicas de los flujos en las áreas inundadas (profundidad, velocidad del flujo y caudal unitario (velocidad x profundidad)). Para cada evento hidrológico se pueden generar mapas de profundidades de inundación, mapas de velocidades del flujo y mapas de caudales unitarios. Generalmente en zonas relativamente planas, las velocidades de los flujos y los caudales unitarios son muy bajos, por lo cual es posible excluir para el análisis y determinación de la amenaza las variables hidrodinámicas de velocidad del flujo y caudal unitario.

Algunos modelos matemáticos cuentan con las herramientas y las facilidades para generar de una manera más ágil los mapas de inundaciones; para poder realizarlo se debe disponer del MDT del área de estudio, el cual deberá ser importado al modelo hidráulico. Por ejemplo, el modelo hidráulico HEC-RAS cuenta con la extensión para SIG (específicamente para ArcView) denominada HEC-GeoRAS, la cual consiste de un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades diseñadas para procesar datos georeferenciados que permiten, bajo el entorno de los SIG, facilitar y complementar el trabajo con el modelo hidráulico. HEC-GeoRAS crea un archivo para importar a HEC-RAS datos de geometría del terreno, incluyendo los cauces de ríos y canales, secciones transversales, etc.

Para cada simulación hidrodinámica, en HEC-GeoRAS se genera un modelo digital de la superficie libre del agua. Este modelo digital y el MDT se convierten a formato GRID (datos raster), los cuales se interceptan para generar los mapas de inundaciones.

Cuando el modelo hidráulico utilizado no dispone de este tipo de herramientas y utilidades, para generar los mapas de inundaciones se puede hacer uso de programas y herramientas de SIG, como puede ser el programa ArcGIS. Para ello los resultados de la modelación hidrodinámica deberán exportarse en un archivo de formato gis para que conjuntamente con el archivo del modelo digital de elevaciones del terreno y los niveles de agua se puedan interceptar con ayuda del programa de Arcgis lo cual arroja como resultado los mapas de inundación.

La metodología aplicada para el desarrollo de los mapas de inundación consistió en utilizar los niveles simulados con el Hec Ras mediante la aplicación de la

herramienta Hec-GeoRAS 10.1 que es una extensión para ArcGis 10 desarrollada conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Army Corps of Engineers y el Environmental System Research Institute (ESRI). Esta herramienta es un conjunto de procedimientos, utilidades para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con HEC-RAS.

De esta manera se exportan los datos con extensión GIS y desde el programa Arc Gis 10.1 se importan la extensión arrojada en .SDF, generando como resultados finales: superficies de inundación para cada un periodo de retorno de 30 años sin alternativas estructurales.

Las profundidades en los niveles tuvieron una variación de 10m. La mancha de inundación creada con Ras Mapper manejo tamaño en las celdas de 5x5m, agrupándolo con el modelo digital de terreno suministrado estudio topo-batimétrico realizado por la CVC en el año 2012. Estos resultados se pueden apreciar en la Figura 25 y Anexo E1.

Por lo anterior se puede concluir que los mapas de inundación permiten crear una serie de medidas a optarse, con la finalidad de disminuir la afectación de los bienes que existan cerca o en el entorno perimetral. Algunas de ellas se muestran a continuación:

- Seguro de inundación
- Aberturas de las estructuras (temporal o permanente).
- Elevación de estructuras existentes.
- Construcción de estructuras palafíticas (sobre pilotes).
- Construcción de muros o diques aislando la estructura.
- Reubicación de artículos que puedan ser dañados.
- Reglamentación de la ocupación del área sometida a amenaza de inundación
- Código de construcción adecuado para estas situaciones
- Compra de áreas de inundación

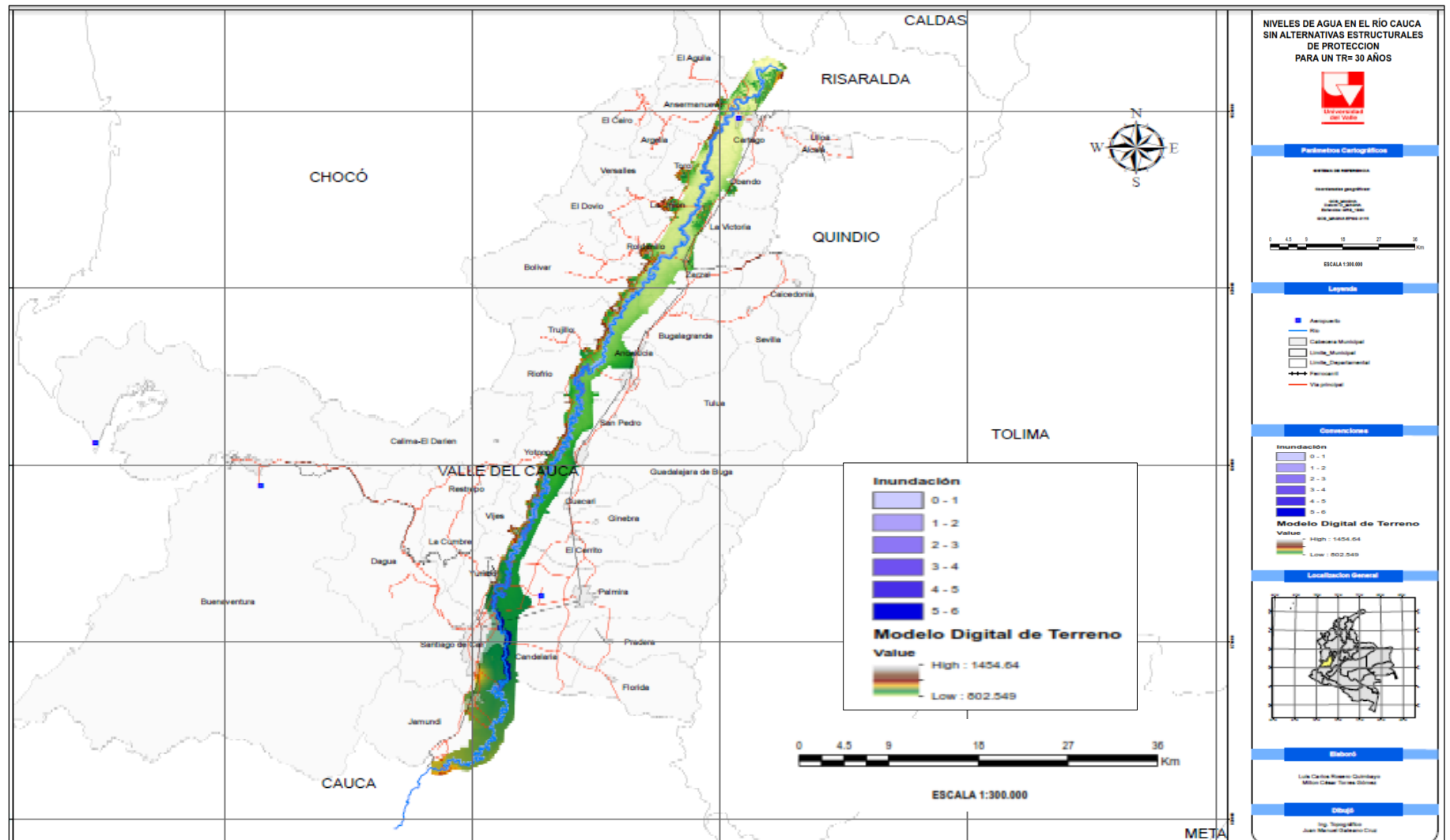


Figura 25. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 30 años sin alternativas estructurales.

10.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 CONCLUSIONES

En el presente estudio se plantearon y evaluaron, mediante la modelación matemática, varias alternativas estructurales de protección con el fin de lograr un mejor manejo de las inundaciones en el valle alto del río Cauca, estimando los posibles efectos de tales medidas sobre la hidrodinámica del río, en especial las variaciones en los niveles de agua. Lo anterior teniendo en cuenta los recurrentes problemas causados por las inundaciones provocadas por los desbordamientos del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, propiciadas por los altos niveles en el río y la rotura de algunos de los diques marginales de protección.

En el desarrollo del proyecto inicialmente se realizó la caracterización física, hidrológica, hidráulica y sedimentológica del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca. Posteriormente se implementó el modelo matemático unidimensional HEC-RAS para simular la hidrodinámica del río Cauca y sus principales tributarios. HEC-RAS es un software de uso libre, lo cual permitirá disponer a futuro de este modelo del río Cauca, el cual podrá ser aplicado por diferentes instituciones y usuarios interesados en el tema de la gestión del riesgo por inundaciones y en la recuperación y conservación del río Cauca.

Una vez construido el modelo del río Cauca, se plantearon y simularon varias medidas estructurales de protección, como son diques marginales al río Cauca a distancias de 60 m, 150 m y 200 m de su cauce. Con ello se pretende: (i) reducir los niveles de agua en el río durante las crecientes (con lo cual se reduce la presión sobre los diques y, por ende, se disminuye la probabilidad de falla de los mismos) y (ii) brindarle un mayor espacio al río en la planicie adyacente para que desarrolle sus funciones, en particular, lograr una mejor laminación de las crecientes y permitir que los procesos: ecológicos, de suelos, de flora, fauna y el uso de la tierra en las llanuras de inundación tengan un mejor funcionamiento, ya que cada proceso involucra varios ecosistemas, en los que hay ambientes acuáticos permanentes, temporales y sabana de tierra firme.

Finalmente se generó el mapa de la inundación que causaría el desbordamiento del río Cauca durante una creciente con un periodo de retorno de 30 años, asumiendo que no existiesen estructuras marginales de protección. Este mapa representa la amenaza real por el fenómeno de inundaciones en el valle alto del río Cauca y evidencia claramente el problema que se ha generado a lo largo de varias décadas a causa de la ocupación indebida del territorio, ya que en toda el área amenazada se ha dado el crecimiento acelerado de asentamientos humanos de desarrollo incompleto, la ejecución de proyectos urbanísticos en áreas susceptibles a inundaciones y el desarrollo de diferentes actividades productivas, principalmente agrícolas y ganaderas.

A continuación se presentan las principales conclusiones del estudio:

- **Caracterización del río Cauca en su valle alto geográfico**

El río Cauca nace en el Macizo Colombiano, departamento del Cauca, y desemboca en el Brazo de Loba del río Magdalena, departamento de Bolívar; presenta una longitud total de 1,350 km y un área de drenaje de 63,300 km². En su recorrido se identifican cuatro zonas con características morfológicas bien diferenciadas, como son: (i) Cauca Alto (Nacimiento-Timba), (ii) Valle Alto (Timba-La Virginia), (iii) Cauca Medio o Cañón del Cauca (La Virginia-Tarazá, Antioquia) y (iv) Cauca Bajo (Tarazá-Pinillos, Bolívar).

El tramo objeto del estudio comprende el sector del Valle Alto del río Cauca, el cual presenta una longitud aproximada de 220 kilómetros y un ancho promedio de 20 kilómetros y una extensión de 440,000 hectáreas, de las cuales 100,000 se ubican en la zona marginal del río (la llanura aluvial o de inundación). El Valle Alto presenta elevaciones que fluctúan entre los 1,000 msnm y los 900 msnm al sur y norte del departamento del Valle del Cauca, respectivamente. En el sector se presentan dos períodos de bajas precipitaciones (enero-febrero y junio-septiembre) y dos de altas precipitaciones (marzo-mayo y octubre-diciembre), con un promedio anual de lluvias que varía entre 800 y 3,800 mm; la precipitación media anual es de 1,300 mm.

En este sector el cauce principal del río Cauca presenta un ancho medio de 105 metros y una profundidad media a banca llena de 7.4 metros. El perfil longitudinal del río presenta una forma cóncava, con una pendiente hidráulica que puede oscilar entre 7×10^{-4} al sur, en el sector Salvajina-La Balsa y 1.5×10^{-4} al norte, en el sector Mediacanoa-Anacaro. La sinuosidad media del río en todo el valle es de 2.0, por lo cual se lo puede clasificar como un río de meandricidad media-alta. El sector de mayor sinuosidad (≈ 3.06) y de mayor movilidad es el ubicado al sur del departamento del Valle del Cauca, entre la estación de Tablanca (corregimiento de Robles, municipio de Jamundí) y la desembocadura del río Desbaratado (municipio de Candelaria). El caudal medio del río Cauca en el sector varía desde 126 m³/s en Salvajina a 531 m³/s en la estación La Virginia, localizadas al inicio y al final del tramo en estudio. La construcción de la represa de La Salvajina varió el régimen de caudales, incrementándolos en épocas de estiaje, y disminuyéndolos en períodos de invierno.

Los ríos afluentes más importantes sobre la margen derecha, donde el valle es más amplio, son los ríos Ovejas, Palo, Amaime, Guadalajara, Tuluá, Bugalagrande y La Vieja; sobre la margen izquierda los tributarios más destacados son los ríos Timba, Jamundí, Riofrío, Cañaveral y Risaralda. El caudal total medio aportado por los afluentes de la margen izquierda es 98,7 m³/s y por la margen derecha es 216,4 m³/s. Muchos de estos afluentes contribuyen a las crecientes y los desbordamientos en el río Cauca, destacándose especialmente los ríos Palo, Ovejas, Timba, Jamundí, Tuluá, Bugalagrande y La Vieja.

- **Modelación matemática del río Cauca**

Se implementó el modelo matemático unidimensional HEC-RAS para simular la hidrodinámica del río Cauca y sus principales tributarios. Para la construcción del modelo se utilizó la batimetría realizada por la CVC en el año 2012 y la topografía levantada mediante tecnología LIDAR en el periodo 2013-2014. para la calibración del modelo se utilizaron las series de niveles y caudales en las estaciones hidrométricas existentes sobre el río Cauca. En la esquematización del sistema fluvial se incluyeron las planicies de inundación. Como principal parámetro de calibración se empleó el coeficiente de rugosidad o resistencia del cauce. Una vez calibrado y verificado el modelo, se realizó el análisis de sensibilidad para determinar la influencia de los principales parámetros físicos (rugosidad, n , etc.) y numéricos del modelo en los procesos hidrodinámicos.

Los factores de rugosidad de Manning finalmente establecidos durante el proceso de calibración fluctuaron entre $0.028 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ y $0.0434 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, dependiendo de las características del río en cada sector (tipos de sedimentos, pendientes, velocidades de la corriente, etc.). Se evaluaron diferentes espaciamientos máximos entre secciones transversales (1000 m, 500 m, 200m y 100m). La distancia entre secciones transversales que permitió un mejor ajuste entre los niveles y los caudales calculados y medidos fue de 200 metros y el intervalo de tiempo computacional fue de 5 minutos.

Por otro lado, los perfiles hidráulicos obtenidos a lo largo del río Cauca mediante la modelación permitió observar que los niveles de desbordamiento son muy variables; esto se debe a la gran irregularidad que presenta la morfología del río, en este caso los niveles de las bancas del cauce, característica muy común en un río aluvial como el Cauca.

Con base en los resultados obtenidos de la modelación matemática del río Cauca se efectuó la simulación de una creciente en el río Cauca con un periodo de retorno de 30 años, encontrándose que los niveles de agua en el río superan los niveles de banca llena en gran parte de la zona de estudio. La modelación realizada considerando las medidas estructurales existentes arroja, como era de esperarse, niveles de agua superiores a los hallados cuando no se toman en cuenta las medidas estructurales.

Se puede afirmar que las medidas estructurales existentes a lo largo del Valle Alto del río Cauca han permitido mitigar el impacto de las crecientes, ya que la extensión de las áreas inundadas se reduce. No obstante, es preciso mencionar que durante la ola invernal del periodo 2010-2011 algunas inundaciones ocurrieron debido a la falla o rotura de los diques marginales de protección ocurridos.

- **Planteamiento y Evaluación de medidas estructurales para la gestión de inundaciones en el valle alto del río cauca**

Con el fin de lograr una mejor gestión del riesgo de inundaciones por desbordamientos del río Cauca se plantearon y modelaron varias medidas estructurales de protección, consistentes en diques marginales al río Cauca, localizados a distancias de 60 m, 150 m y 200 m de su cauce. La modelación mostró, también como era de esperarse, que a medida que se distancian los diques del cauce disminuyen los niveles de agua en el río y la planicie. Esta reducción en los niveles de agua reduce a su vez la presión sobre los diques y, por lo tanto, disminuye la probabilidad de falla de los mismos. Por otra parte, al localizar los diques marginales de protección más distanciados del cauce principal, se contribuye a la recuperación del corredor de conservación del río Cauca.

Los resultados obtenidos mediante la modelación matemática muestran que al localizar los diques a 150 m del río los niveles de agua se reducen en promedio unos 42 cm, con respecto a la alternativa de ubicar los diques a 60 m del río. Al distanciar los diques 200 m del cauce del río Cauca, los niveles de agua disminuyen 58 cm, en promedio (con respecto a la misma alternativa de diques localizados a 60 m del cauce).

Sin embargo, es necesario señalar que esta disminución en los niveles de agua es variable a lo largo de la zona de estudio. Por ejemplo, al comparar los niveles de agua obtenidos al distanciar los diques marginales a 150 m y 200 m del cauce principal, con respecto a los niveles obtenidos al localizar los diques a 60 m, se observa que en la estación La Bolsa (ubicada unos 79 km aguas abajo del embalse de Salvajina) los niveles de agua se reducen en 16 cm y 62 cm, respectivamente; mientras que en la estación Mediacanoa la reducción de niveles son de cerca de 49 cm y 94 cm, respectivamente; en la estación Anacaro, localizada al norte del departamento del Valle del Cauca, los niveles de agua se reducen aproximadamente en 5 cm y 58 cm respectivamente. Todas estas cifras ratifican las bondades de ubicar los diques más alejados del cauce principal del río Cauca.

- **Mapa de inundación**

Los resultados obtenidos de la modelación matemática para una creciente en el río Cauca con un periodo de retorno de 30 años, considerando que no existieran intervenciones en la planicie para controlar los desbordamientos presentados en el río Cauca, permitieron generar los mapas de inundación. Estos mapas reflejan en muy buena medida la extensión de la planicie aluvial o de inundación del río Cauca, la cual se fue perdiendo debido a la ocupación del territorio y el desarrollo de todo tipo de actividades productivas en el mismo. Los mapas de inundaciones muestran la gran variación que se tendría de las profundidades de agua en las zonas inundadas, pudiendo fluctuar entre 1 y 4 m.

10.2 RECOMENDACIONES

- En el estudio realizado se realizó la modelación matemática hidrodinámica del río Cauca, alcanzándose un grado de ajuste bastante aceptable entre los niveles de agua y los caudales medidos y calculados. No obstante, con el fin de mejorar la calibración del modelo aquí construido es recomendable realizar por parte de la autoridad ambiental, encargada del monitoreo del río, lo siguiente: (i) implementar estaciones hidrométricas intermedias, adicionales a las existentes, con el fin de reducir las distancias entre ellas y, por lo tanto, poder tener un mayor detalle y seguimiento de la variación espacial de los niveles de agua y los caudales en el río; (ii) determinar los caudales máximos (durante las crecientes) empleando métodos indirectos, como el método de área-pendiente, con lo cual se puede reducir la incertidumbre en los valores de los caudales máximos registrados; y, (iii) realizar nuevas batimetrías del río tomando secciones transversales con separaciones menores a las consideradas en la última batimetría realizada en el año 2012, como puede ser tomar secciones entre 200 y 300 m de separación.
- Se recomienda aplicar el modelo del río Cauca considerando otros tipos de medidas estructurales para el manejo de las inundaciones, como pueden ser las zonas de almacenamiento temporal y los embalses de regulación en los ríos tributarios. Esto permitirá disponer de un mayor rango de opciones o escenarios a evaluar, teniendo en cuenta las implicaciones ambientales, sociales, técnicas y económicas de cada una de ellas. Con todo ello se busca estar en consonancia con los nuevos paradigmas en el mundo, en cuanto a la forma de interrelacionarnos con los ríos y los ecosistemas fluviales.
- Actualmente existen diques que se encuentran a menos de 60 m del cauce principal del río Cauca, lo cual genera niveles más altos en el río, trayendo consigo el incremento de la presión sobre ellos y aumentando la probabilidad de falla de los mismos. Por esto, resulta necesario y urgente evaluar el estado de los mismos y su relocalización para dar cumplimiento a lo establecido en el Acuerdo CD 052 de 2011 de la CVC. Por lo tanto, se debe realizar un trabajo de catastro exhaustivo, de tal manera que se identifique y caractericen todos los tipos de obras existentes en la planicie, con el objetivo de identificar las estructuras que cumplen o no con el Acuerdo CD 052 de 2011 de la CVC; y posteriormente poder realizar una representación más cercana a la realidad al momento de implementar el modelo hidráulico.
- Se sugiere revisar la regla de operación del embalse de salvajina, considerando escenarios críticos probables, incluyendo el análisis de casos de crecientes e inundaciones históricas. Esto en conjunto con el análisis de los efectos de las diferentes medidas estructurales que se puedan plantear y simular, permitirá establecer una regla de operación actualizada, acorde

con las necesidades de lograr una gestión más eficaz y eficiente de las crecientes del río Cauca durante los periodos invernales.

- Teniendo en cuenta que en la actualidad la CVC cuenta con un modelo geoidal local, un levantamiento topográfico detallado de la llanura de inundación del río Cauca (con tecnología LIDAR) y una batimetría del cauce con secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 600 m, se sugiere en futuros estudios implementar un modelo mixto 1D-2D, mediante el cual los ríos y canales se modelen unidimensionalmente y la planicie de inundación bidimensionalmente. Con ello se tendrá una representación más cercana a lo que realmente ocurre durante el proceso de desbordamiento e inundación de la llanura aluvial, es decir, se tendrá una mejor representación del fenómeno de inundaciones en el valle alto del río Cauca.

11 BIBLIOGRAFÍA

Alveirinho, J.D. (2006). Geología Ambiental. Faculdade de ciencias do Mar e do Ambiente da Universidade do Algarve. Portugal

Aparicio, J. (2003). Lluvias e inundaciones, [en línea], disponible en: <http://www.iaem.es/GuiasRiesgos/Lluviaseinundaciones.pdf>. [Febrero 24 de 2012].

ASOCAR – Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle (2014). Propuesta y modelación hidráulica de escenarios Para la gestión de inundaciones en el Valle alto del río cauca. Proyecto de Zonificación de amenazas por inundaciones del río cauca en su valle alto y planteamiento de opciones de protección. Santiago de Cali, Colombia.

Ayala, C; Ramírez, C; Bocanegra, R. (2011). Metodología para la determinación de mapas de riesgo por inundaciones causadas por el desbordamiento de un río aluvial. Santiago de Cali, Colombia.

Ayala, Carlos O. 2009. Metodología para determinar riesgos por inundación debido al desbordamiento de un cauce aluvial. Tesis de Maestría en Desarrollo Sustentable con Énfasis en Prevención y Atención de Desastres. Universidad del Valle. Cali – Colombia.

BID. 2005. Países latinoamericanos y caribeños débiles en gestión de riesgos de desastres naturales. Disponible en: <http://www.iadb.org/es/noticias/comunicados-de-prensa/2005-01-27/paises-latinoamericanos-y-caribenos-debiles-en-gestion-de-riesgos-de-desastres-naturales-segun-informe.52.html>.

BID. 2010. Los riesgos de desastres naturales continúan altos en América Latina y el Caribe. Disponible en: <http://www.iadb.org/es/noticias/articulos/2010-09-30/desastres-naturales-en-america-latina-y-el-caribe-bid.8017.html>. [Mayo 15 de 2013].

Bocanegra, R. (2013). Un nuevo modelo de medidas estructurales para el manejo de inundaciones en el valle alto del río cauca. Tesis de Grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali.

Brandimarte L. (2002) Medidas Estructurales. UNESCO – IHE. Santiago de Cali.

Cardona, O. (2005). La gestión del riesgo colectivo. Un marco conceptual que encuentra sustento en una ciudad laboratorio.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC – Universidad del Valle (2000a). Caracterización de Ríos Tributarios del Río Cauca Tramo Salvajina La Virginia. Proyecto Modelos del río Cauca – PMC Fase I. Volumen IV Universidad del Valle, Eidenar, CVC. Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC – Universidad del Valle (2000b). Caracterización de Ríos Tributarios del Río Cauca Tramo Salvajina La

Virginia. Proyecto Modelos del río Cauca – PMC Fase I. Volumen VIII Universidad del Valle, Eidenar, CVC. Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC – Universidad del Valle (2000c). Modelación Matemática del Río Cauca Tramo Salvajina La Virginia.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC – Universidad del Valle (2001). Proyecto PMC – fase I – Volumen VIII. Modelación Matemática del Río Cauca Tramo Salvajina – La Virginia. Universidad del Valle. Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC – Universidad del Valle (2007). El Río Cauca en su Valle Alto. Santiago de Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – Universidad del Valle (2007a). Análisis de la incidencia de la operación del embalse de Salvajina sobre el río Cauca. Tramo Salvajina – Mediacanoa. Proyecto de Modelación del Río Cauca PMC, Fase III, Volumen XV. Santiago de Cali, Colombia.

Chow Ven Te. (1994). Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill. Santafé de Bogotá.

Cruz, R. (2012). GESTIÓN INTEGRADA DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN COLOMBIA, [en línea], disponible en: http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27223/TFM_Gesti%C3%B3n_%20Inundaciones_Colombia_Karime_Sedano.pdf?sequence=1. [Mayo 27 de 2013].

EIRD/ONU. (2011). Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres. Ginebra : Green Ink, Devon, Reino Unido, 2011.

Escuder, I, et.al.. 2010. SUFRI- WP3. Strategies of Urban Flood Risk Management. Riesgo residual y análisis de vulnerabilidad. Universidad Politécnica de Valencia . Valencia, España : s.n., 2010.

Fournier, A.E.(1985). The Quantification of Seismic Hazard for the Purposes of Risk Assessment. International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje.

Hill, C., Verjee, Firoz, (2012). Flash Flood Early Warning System Reference Guide. University Corporation for Atmospheric Research, East-West Highway Silver Spring.

IDEAM. 2004. Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. Bogotá DC : Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004. Vol. Capítulo 3.

IDEAM. (s.f.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales, [en línea], disponible en:

<https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/000001/cap7.pdf>. [Mayo 04 de 2013]

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2011). Reporte final de áreas afectadas por inundaciones 2010 – 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Agua/20120508_Repór_fin_areas_afec_inun_2010-2011.pdf [Mayo 04 de 2013].

Invias, (2001). Control de inundaciones. Ministerio de transporte de Colombia. Bogotá.

Koolhaas, M. (2003) Embalses, Diseño y Construcción, Estructuras Hidráulicas para riego.

Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. Ciudades en Riesgo. Comp. MA, Fernández. Perú, La Red. p. 21-59.

Mateu, JF. 1990. Avenidas, y riesgo de inundación en los sistemas fluviales mediterráneos de la península ibérica. [Art]. Boletín de la asociación de geógrafos españoles, No 10. 1990. págs. 45-86.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)., et al. (2009). PROGRAMA PARA EL SANEAMIENTO, MANEJO Y RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA, [en línea], disponible en: http://www.crc.gov.co/files/Conpes_3624.pdf [Marzo 16 de 2014].

OMM. (2006). Organización Meteorológica Mundial. Aspectos Jurídicos E Institucionales De La Gestión Integrada De Crecidas, [en línea], disponible: http://www.gwp.org/Global/GWPSAm_Files/Publicaciones/Gesti%C3%B3n%20de%20Inundaciones/Aspectos-jur%C3%ADdicos-e-institucionales-de-la-GIC.pdf. [Diciembre 1 de 2013].

OMM/UNESCO, (1974), "Glosario hidrológico internacional", WMO/OMM/BMO, No. 385, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza.

OPS. (2010). Organización Panamericana de la Salud. Ola Invernal Fenómeno De La "Niña" – Colombia, [en línea], disponible en: http://www.disaster-info.net/PED-udamerica/documentos/COL_OPS_SitRep2_OlaInvernal_29Nov2010.pdf. [Junio 20 del 2013].

OSSO. (2005) Marco Teórico. Urbanización y desastres, [en línea], disponible en: http://www.osso.org.co/docu/tesis/2005/elementos/MarcoTeorico_UrbanizacionYDesastres.pdf. [Junio 22 de 2013].

Puertas, O., Carvajal, Y., Quintero, M. (2011). Estudio de Tendencias de la Precipitación Mensual en la Cuenca Alta-Media del Río Cauca, Colombia, [en línea], disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622390013> [Marzo 16 de 2014].

Ramírez, C., Santacruz, S., Bocanegra, R., Sandoval, M. (2010). Incidencia Del Embalse De Salvajina Sobre El Régimen De Caudales Del Río Cauca en Su Valle Alto, [en línea], disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434011> [Marzo 22 de 2014].

Ramírez P. E., Brazaola R. A., Edeso F. J. (2002) Cartografía de Peligro de Inundación mediante sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos e hidráulicos, XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España

Ribera M. L. (2004) Documentos Análisis de Geografía. 43, 2004 153-171

Riccardi G. A. (1997). Elaboración de mapas de riesgo de inundación por medio de la modelación matemática hidrodinámica Universidad Nacional de Rosario., Rosario Argentina.

Sandoval, M. (2011). La protección contra inundaciones en el Valle del Cauca - Historia y nuevo paradigma, [en línea], disponible en: <http://www.valledelcauca.gov.co/planeacion/descargar.php?id=7835> [Junio 20 de 2013]

Sandoval, M. C. (2012). La protección contra inundaciones en el Valle del Cauca: Historia y Nuevo Paradigma. Cali: CVC.

Semana. (2011). Inundaciones en Colombia: igual a anegar Bogotá 27 veces. [en línea]. Disponible en: <http://www.semana.com/nacion/inundaciones-colombia-igual-anegar-bogota-27-veces/155454-3.aspx> [Junio 20 de 2013]

Simons, D.B. et al. 1977. Flood flows, stages and damages. Fort Collins: Colorado State University.

SIAC, (2013). Sistema de Información Ambiental de Colombia. Fenómenos "El Niño" y "La Niña", [en línea], disponible en: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=374&conID=1240> [Diciembre 1 de 2013].

Suárez, Dora C. 2008. Desarrollo de Indicadores de Riesgo y Gestión del Riesgo a Nivel Urbano para el Diagnóstico y la Planificación en Manizales. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.

Thornbury, W.D. (1955), Principles of geomorphology, primera edición.

Tucci, C.E.M & Bertoni, J.C. 2006. Gestión de inundaciones urbanas. Porto Alegre, Brasil :WHO/OMM, 2006.

Tucci, CE. 2007. Gestión de inundaciones urbanas. Porto Alegre, Brasil : WMO, 2007.

UNISDR. 2009. Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Ginebra, Suiza : Estrategia Internacional para la reducción de desastres de las Naciones Unidas (UNISDR), 05 de 2009.

USAID. 1993. Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado: Capítulo 8: Definición de llanura de inundación y evaluación del peligro de inundaciones. En [línea], disponible en: <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea65s/begin.htm#Contents> [Junio 15 de 2015]

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, River Analysis System HEC-RAS, User Manual-Draft, Hydrologic Engineering Center, Davis, Flood Plain Management Program, Handbook for Publics Officials. Department of the Army, State of California, Written by Mr Gary W Brunner. September 1998. Approved for Public release. Distribution Unlimited.

Van Rijn, L., C. (1993). Principios de Transporte de Sedimentos en Ríos, Estuarios y Mares Costeros. Aqua Publications. Ne Netherlands.

Villagran, J. C. 1999. Experiencias y contribuciones para la preparación antes los desastres naturales en América Central: Reforzamiento de estructuras locales y sistemas de alerta temprana,. Guatemala : RELSAT. Proyecto Reforzar Estructuras Locales y Sistemas de Alerta Temprana, 1999.

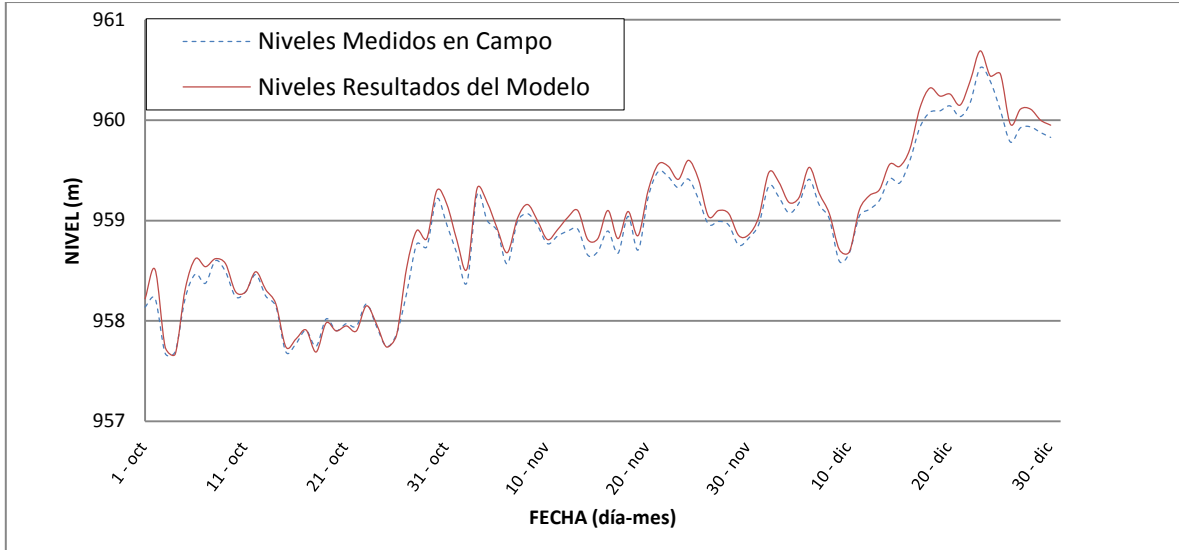
Velis, L & Campos, N. 1991. Los Desastres en el Salvador. Una Visión Histórico-Social. Desastres por Actividad Hidrometeorológica. San Salvador, SV : Centro de Protección para Desastres, 1991. p. 87. Vol. II.

Zaragoza. (Sf). Crecidas e inundaciones en la cuenca del Ebro. En [línea], disponible en: <http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/materialesdidacticos/otros/crecidas-ficha.pdf>. [Junio 15 de 2015].

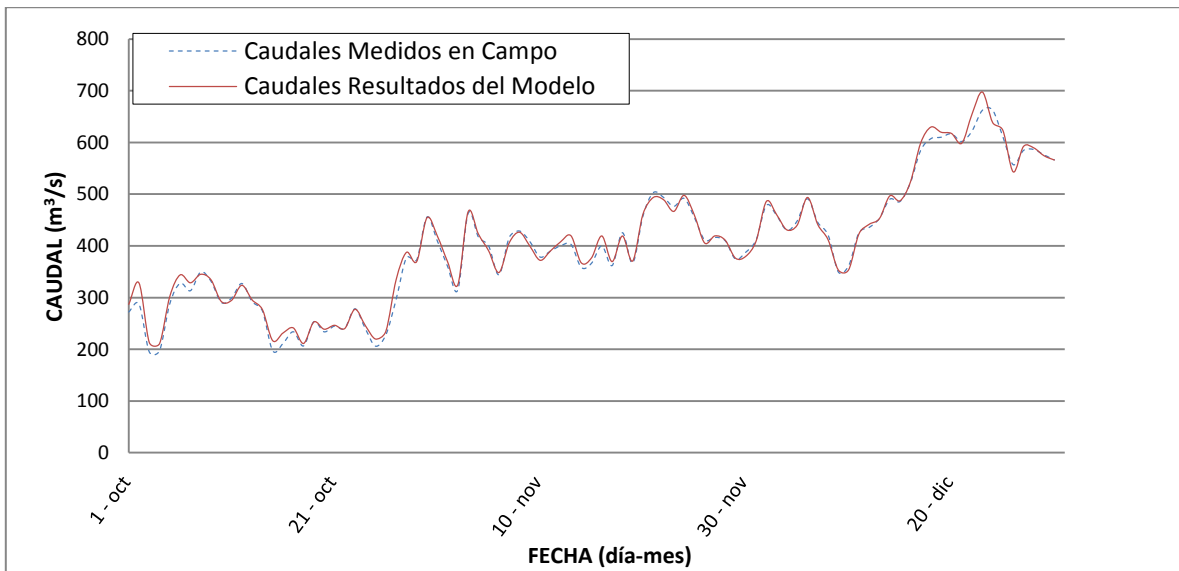
Zúñiga, A., Falla, M. y Bastidas, M.L. (2005). Situación actual de la cuenca del alto Cauca. Paquete de trabajo 1 (WP01) – CVC, Proyecto 018436 Twilatin, Proyecto CVC No 135, Santiago de Cali, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2008.

12 ANEXOS

ANEXO A Verificación del modelo hidrodinámico en las estaciones hidrométricas del río Cauca



**Figura A-1. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa
Periodo Octubre – Diciembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido**



**Figura A-2. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Bolsa
Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudal calculado vs Caudal medido**

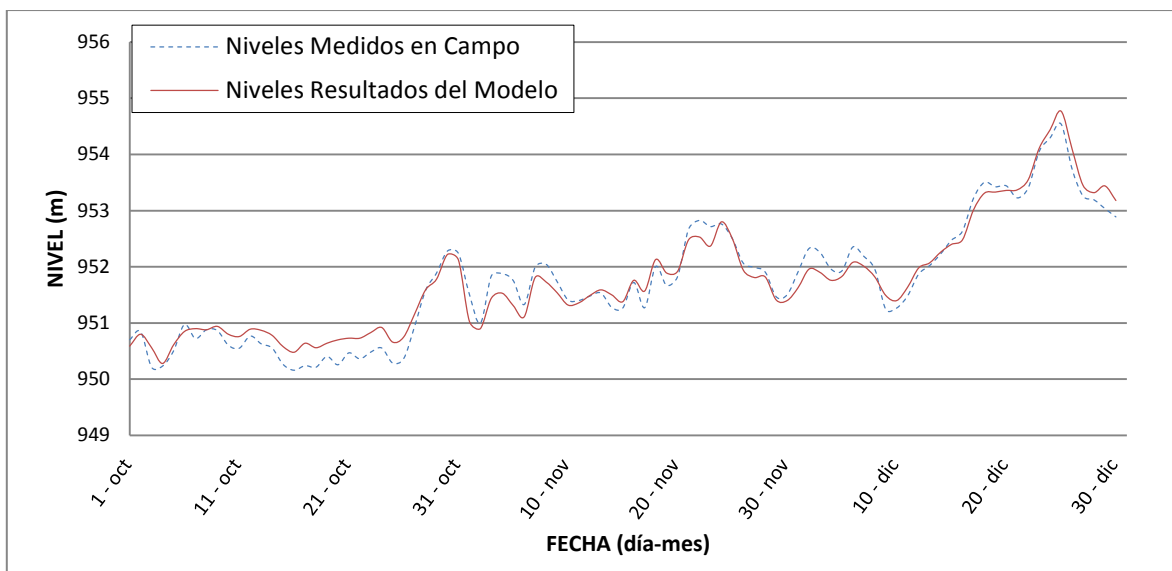


Figura A- 3. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: El Hormiguero Periodo Octubre – Diciembre 1999. Nivel calculado vs Nivel medido

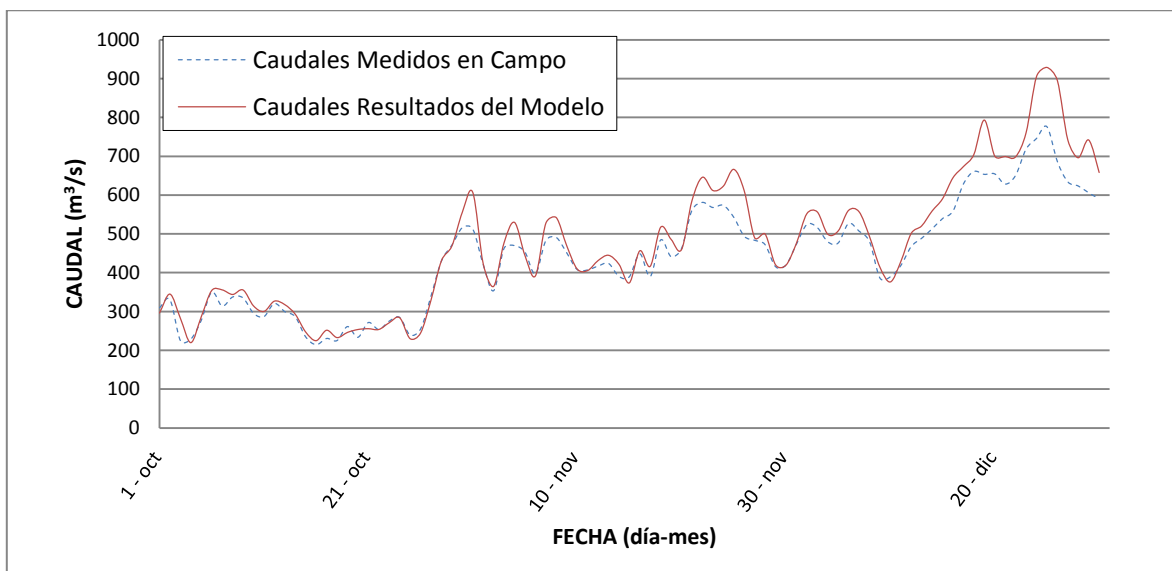


Figura A- 4. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: El Hormiguero Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculado vs Caudales medidos

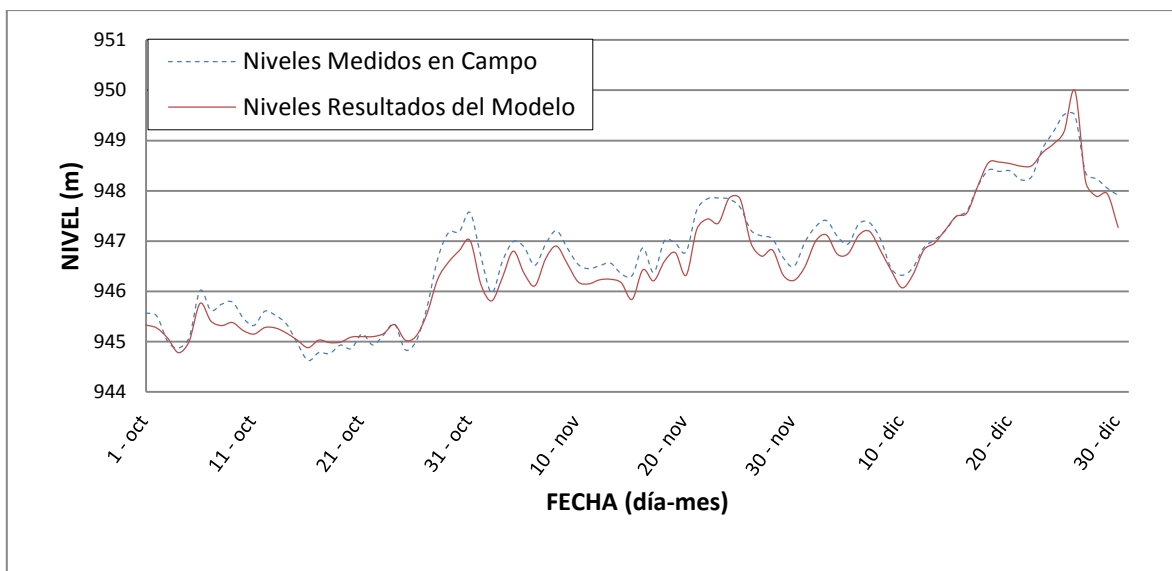


Figura A- 5. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos

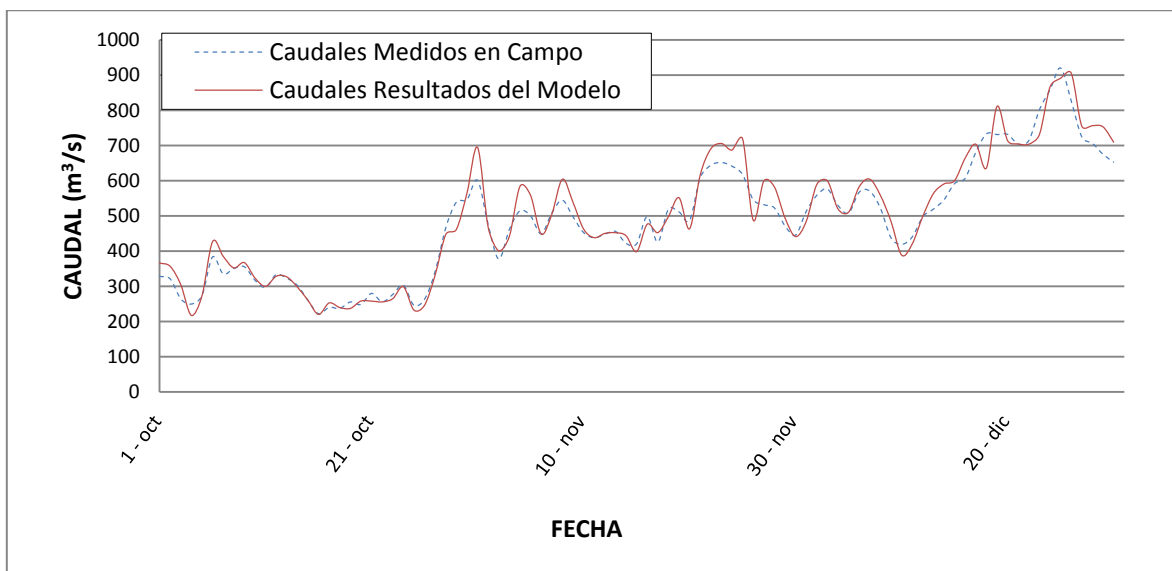
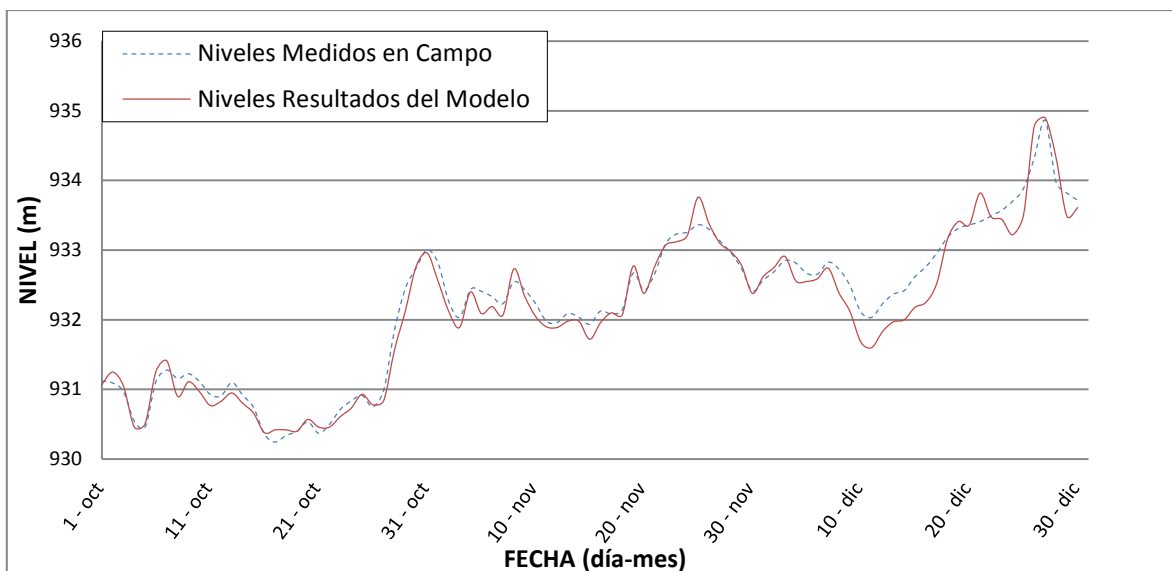
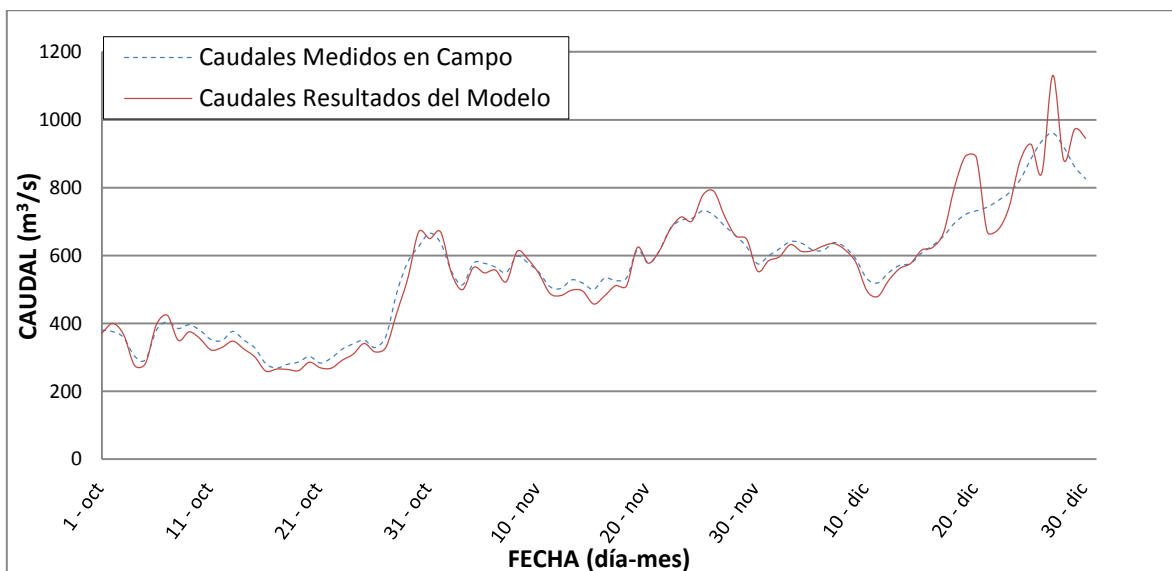


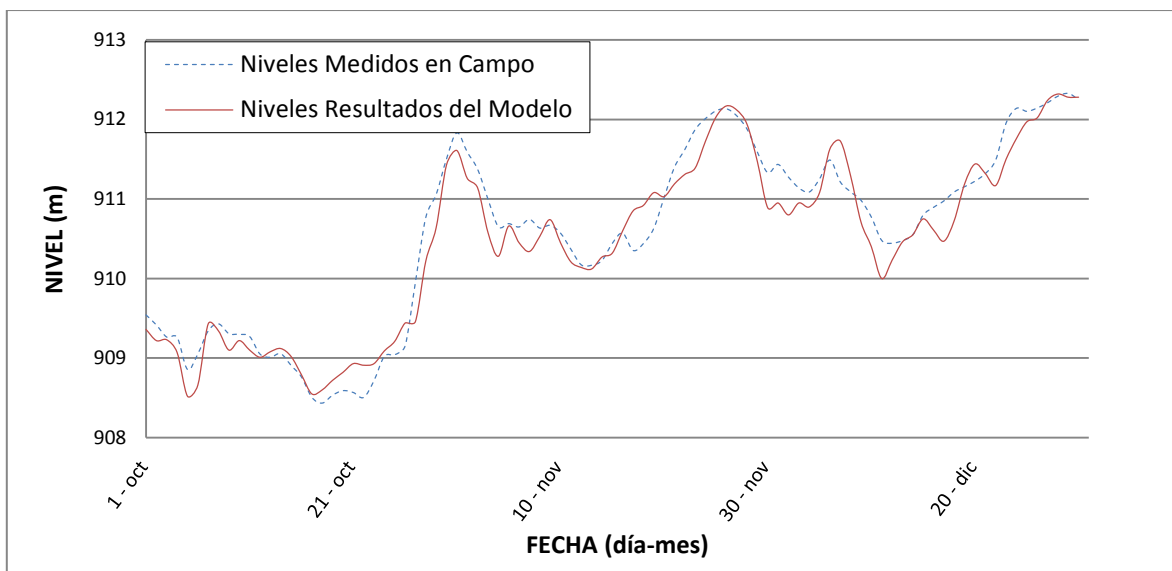
Figura A-6. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Juanchito Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales medidos



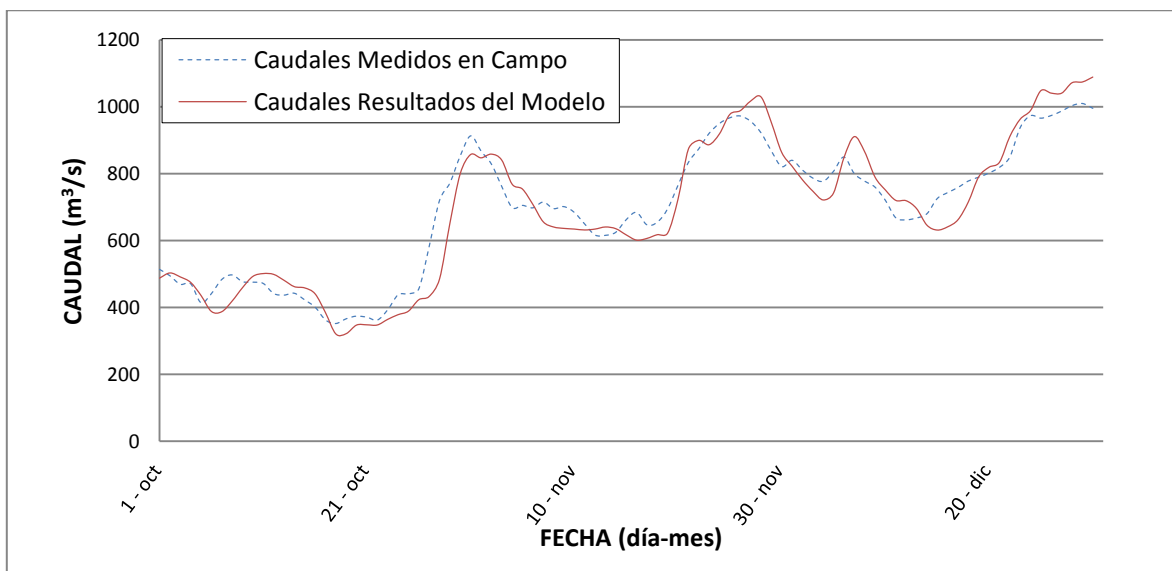
**Figura A- 7. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa
Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos**



**Figura A- 8. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa
Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales
medidos**



**Figura A-9. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Mediacanoa
Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales
medidos**



**Figura A-10. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Guayabal
Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculados vs Caudales
medidos**

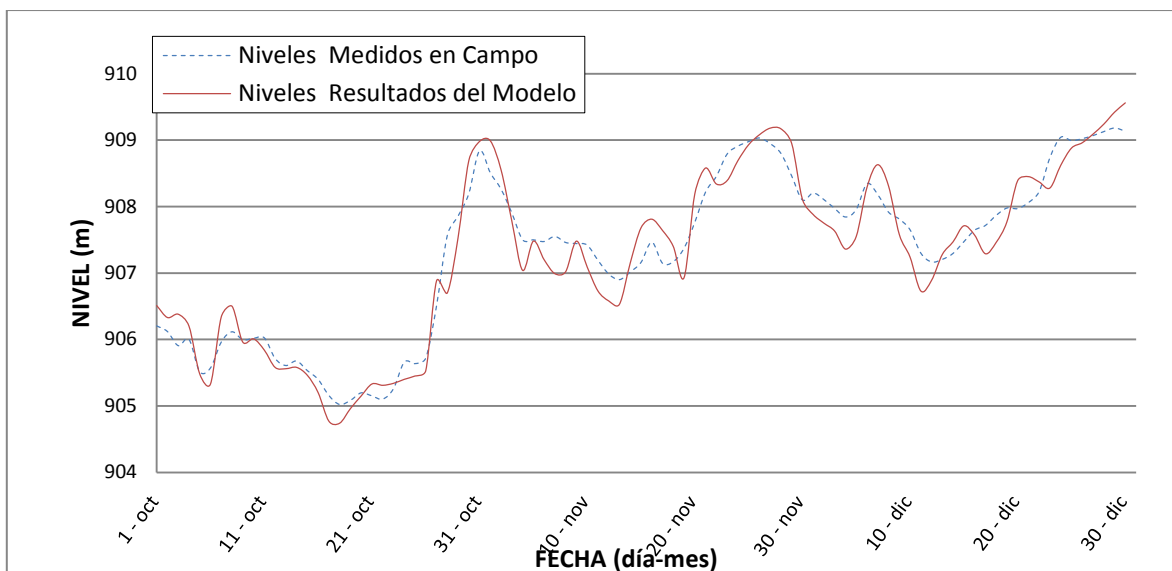


Figura A- 11. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos

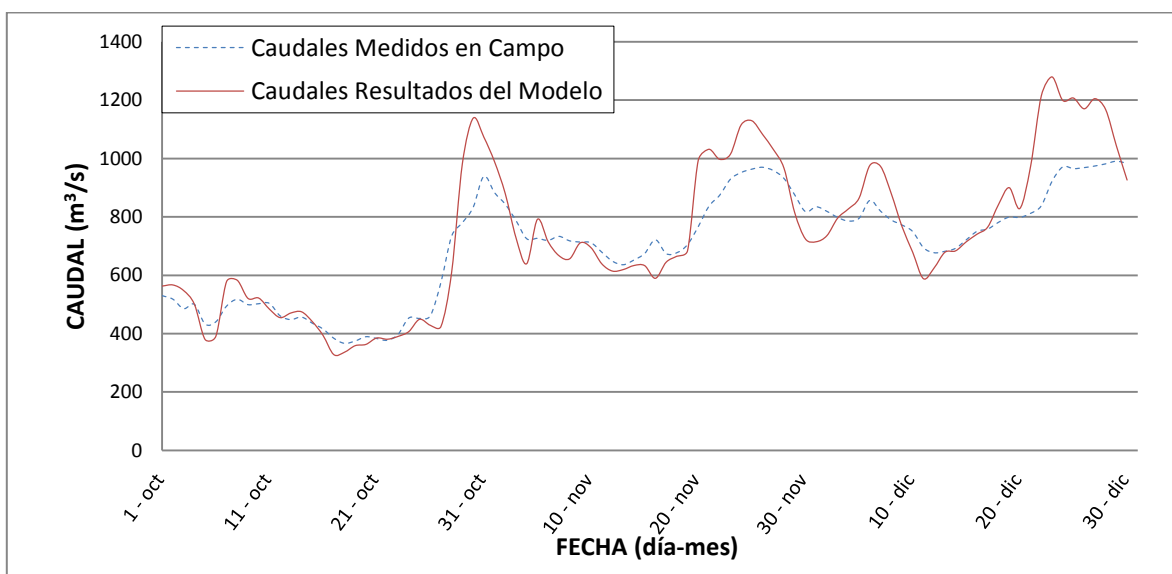


Figura A- 12. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: La Victoria Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculado vs Caudales medidos

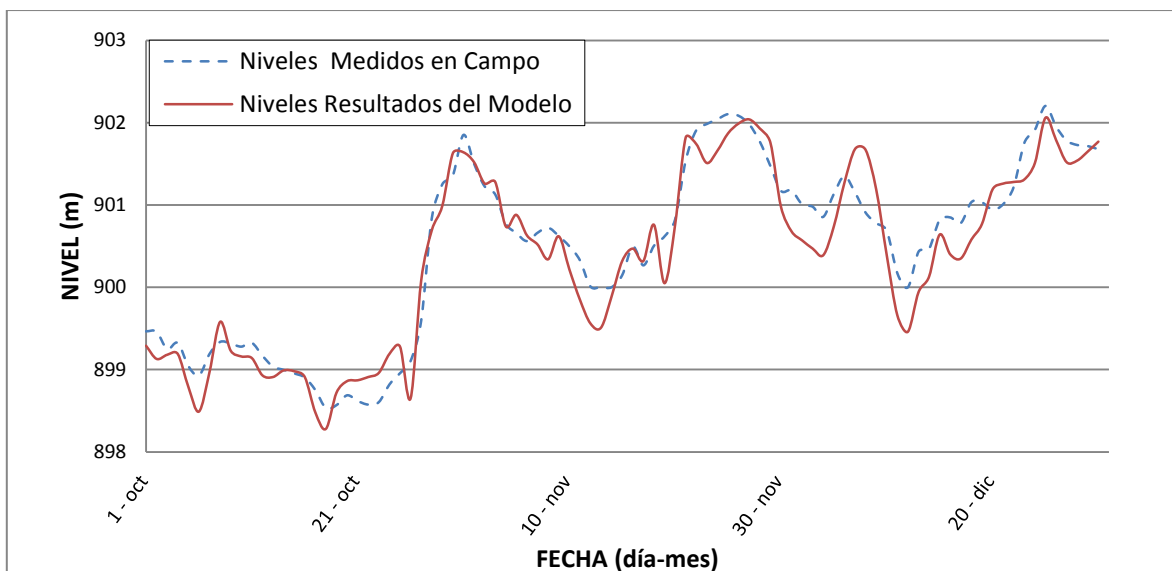


Figura A- 13. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre – Diciembre 1999. Niveles calculado vs Niveles medidos

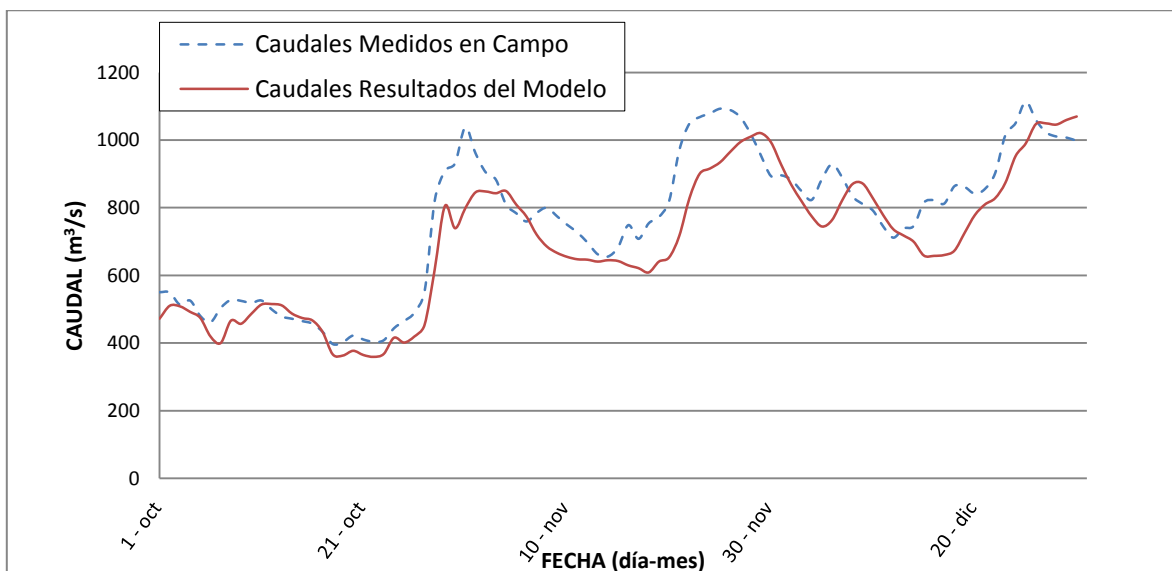


Figura A- 14. Verificación del modelo hidrodinámico Estación: Anacaro Periodo Octubre – Diciembre 1999. Caudales calculado vs Caudales medidos

ANEXO B. Análisis de Sensibilidad: influencia del espaciamiento máximo entre secciones Δx_{max} en las estaciones hidrométricas del río Cauca

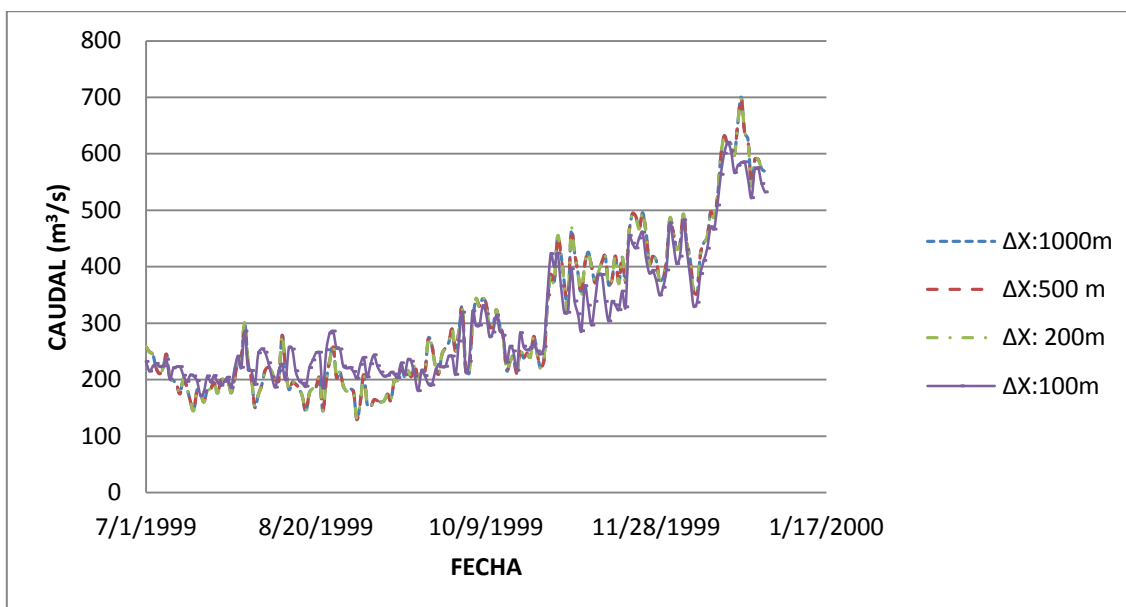


Figura B- 1. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los Caudales Estación: **La Bolsa**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

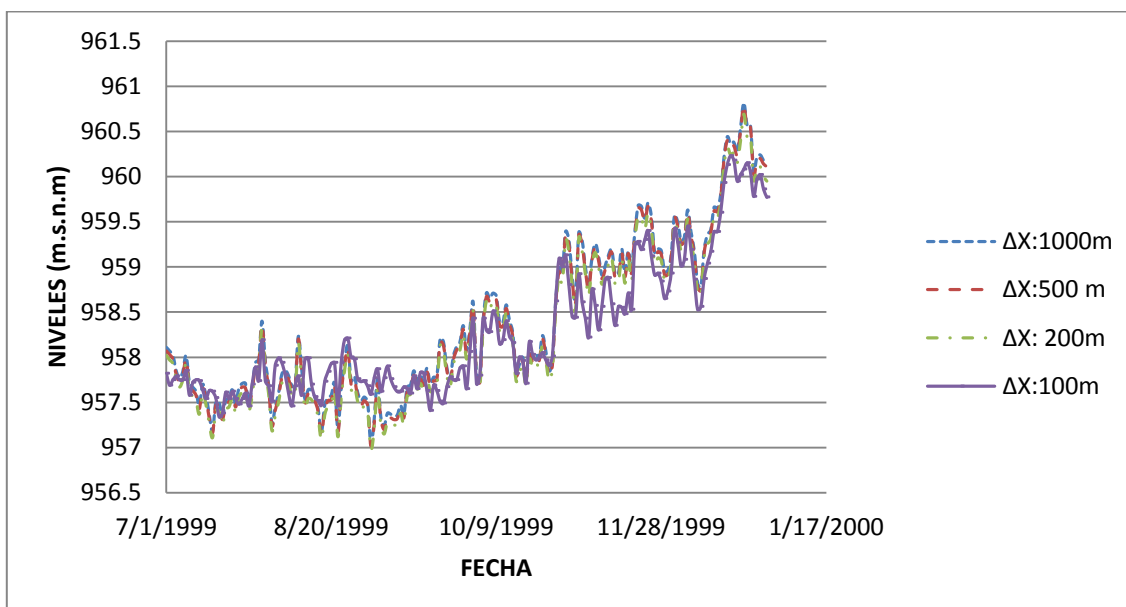


Figura B- 2. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los Niveles estación: **La Bolsa**-periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

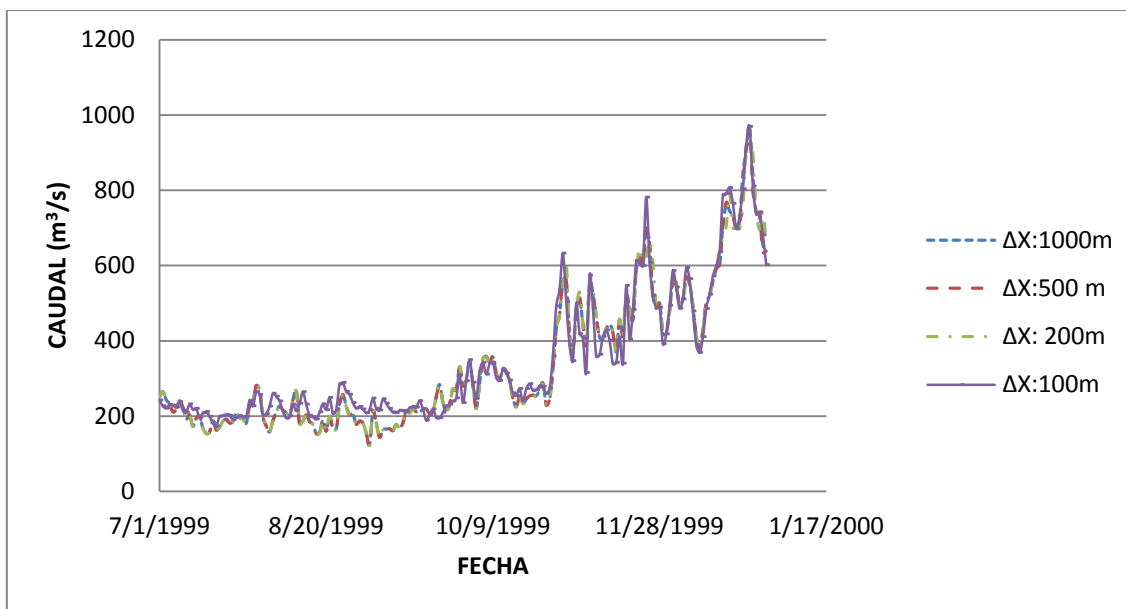


Figura B- 3. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los caudales Estación: **Hormiguero**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

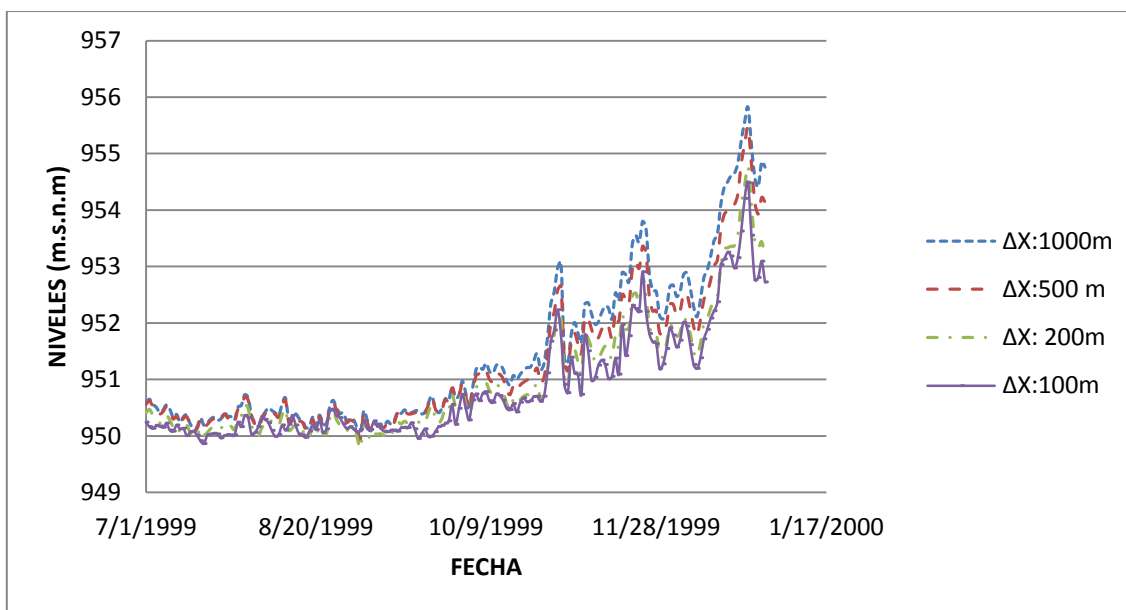


Figura B- 4. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los Niveles Estación: **Hormiguero**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

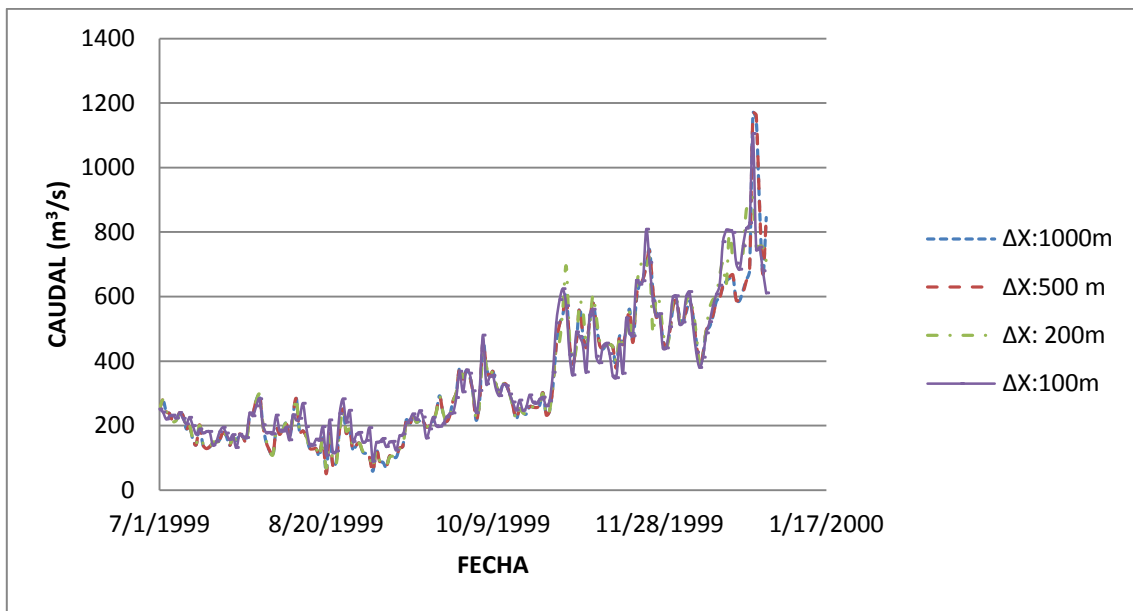


Figura B- 5. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los caudales Estación: **Juanchito**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

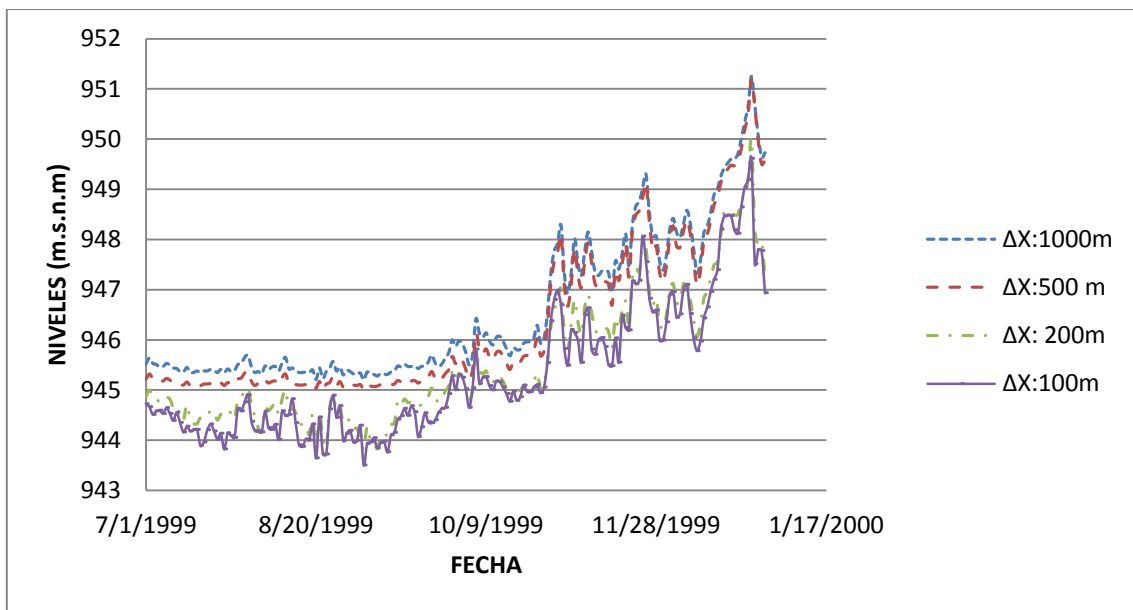


Figura B- 6. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los Niveles estación: **Juanchito**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

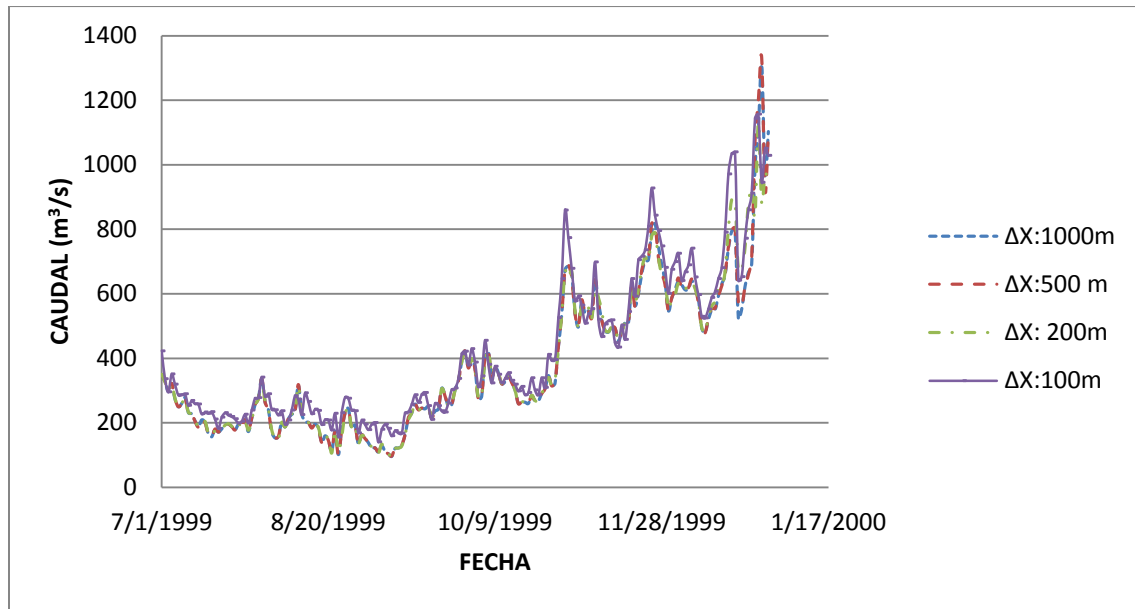


Figura B- 7. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los caudales Estación: **Mediacanoa**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

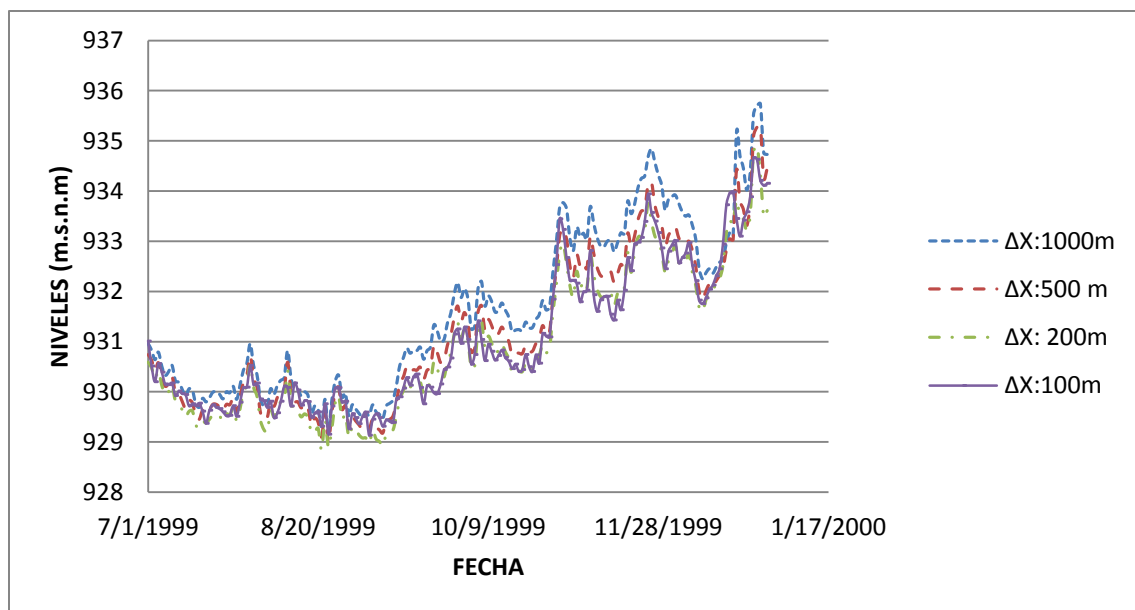


Figura B- 8. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en Los Niveles Estación: **Mediacanoa**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

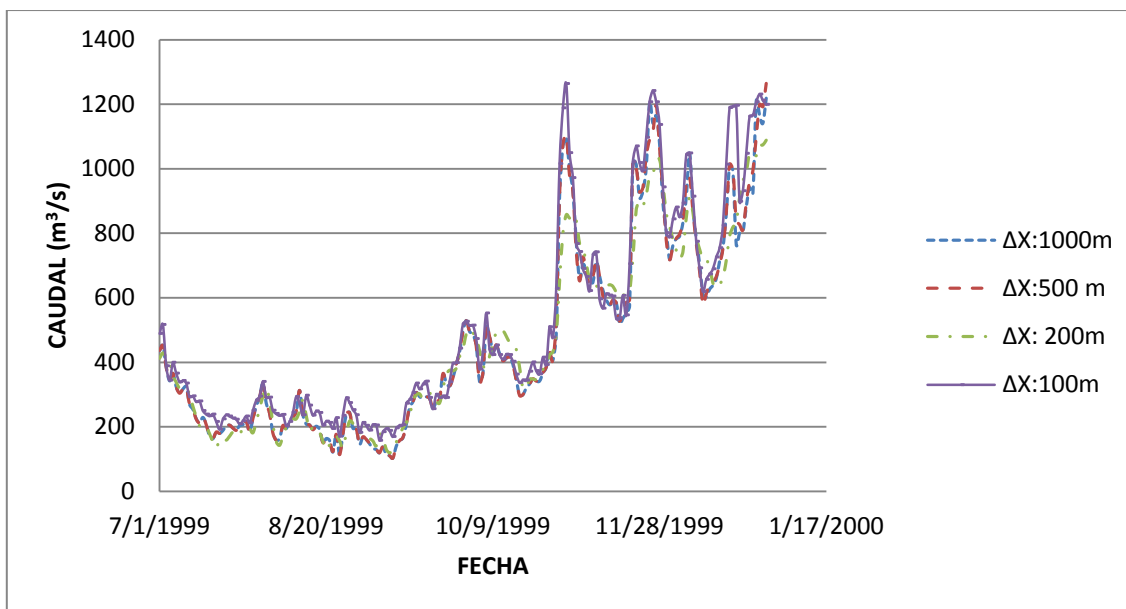


Figura B- 9. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los caudales Estación: Güayabal-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

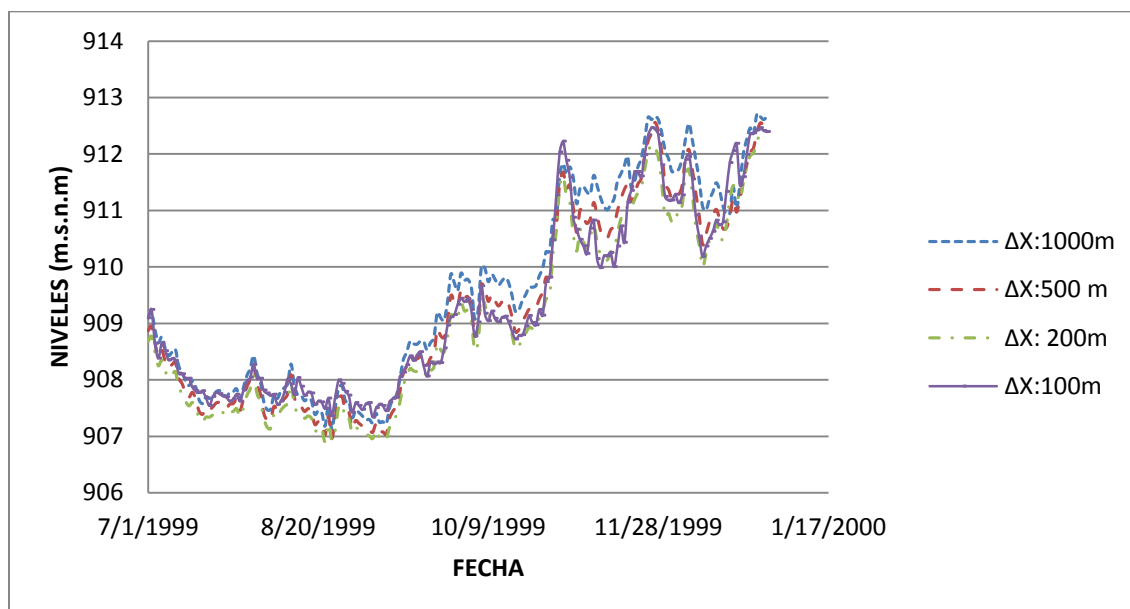


Figura B- 10. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en Los Niveles Estación: Güayabal-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

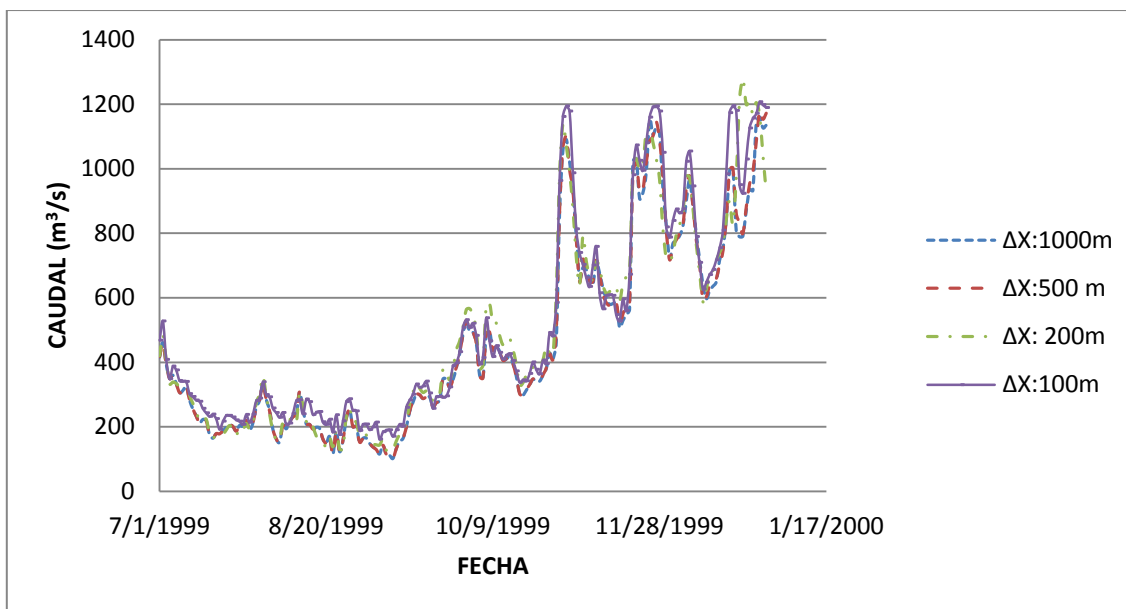


Figura B- 11.Influencia del espaciamento máximo (Δx) en los caudales Estación: La Victoria-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

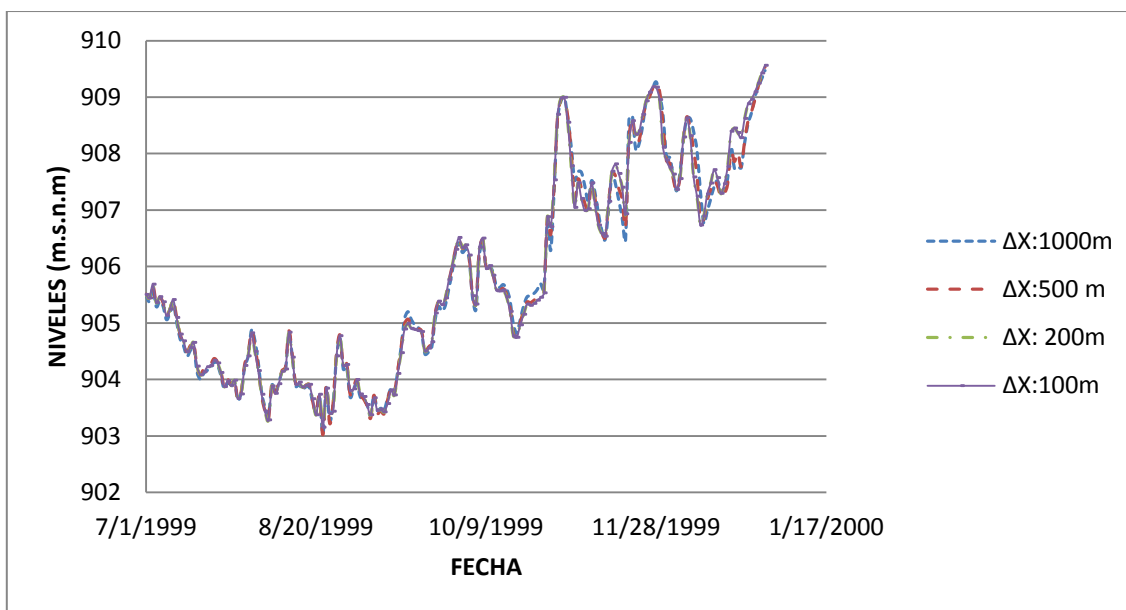


Figura B- 12. Influencia del espaciamento máximo (Δx) en Los Niveles Estación: La Victoria-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

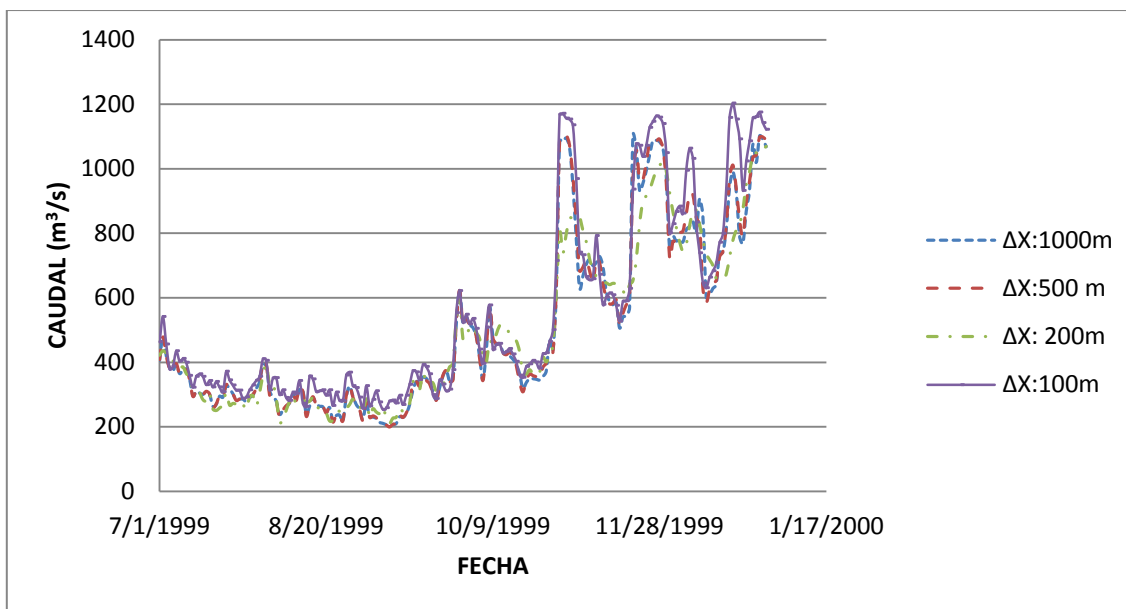


Figura B- 13. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en los caudales Estación: **Anacaro**-Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

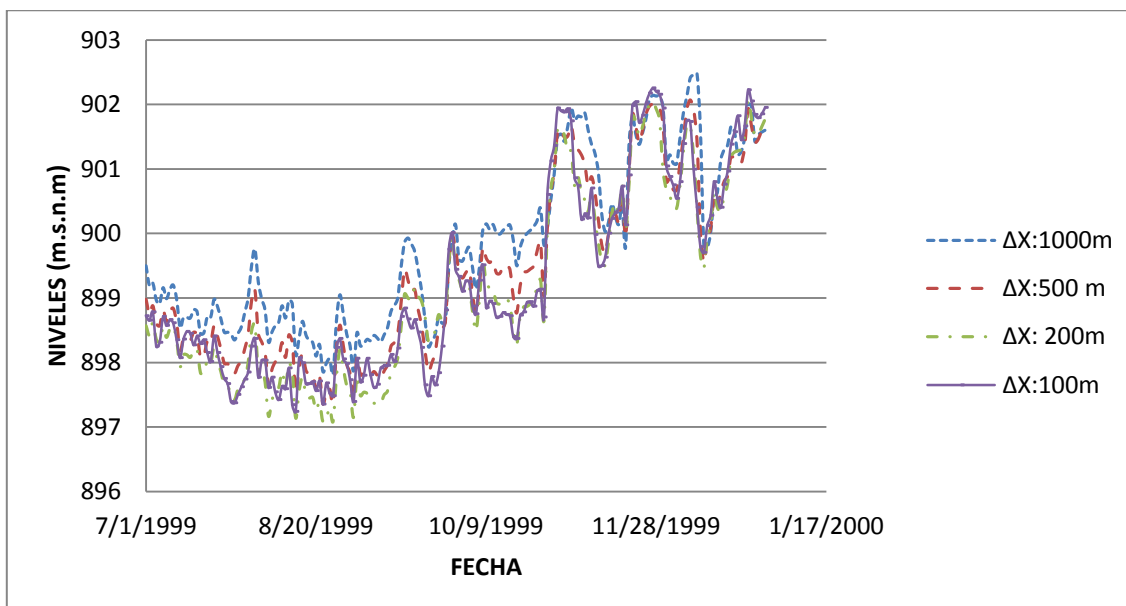


Figura B- 14. Influencia del espaciamiento máximo (Δx) en Los Niveles Estación: **Anacaro** -Periodo: Julio –Diciembre 1999 ($\Delta t= 5$ minutos)

ANEXO C. Análisis de Sensibilidad: influencia del intervalo de tiempo Δt entre secciones Δx_{max} en las estaciones hidrométricas del río Cauca

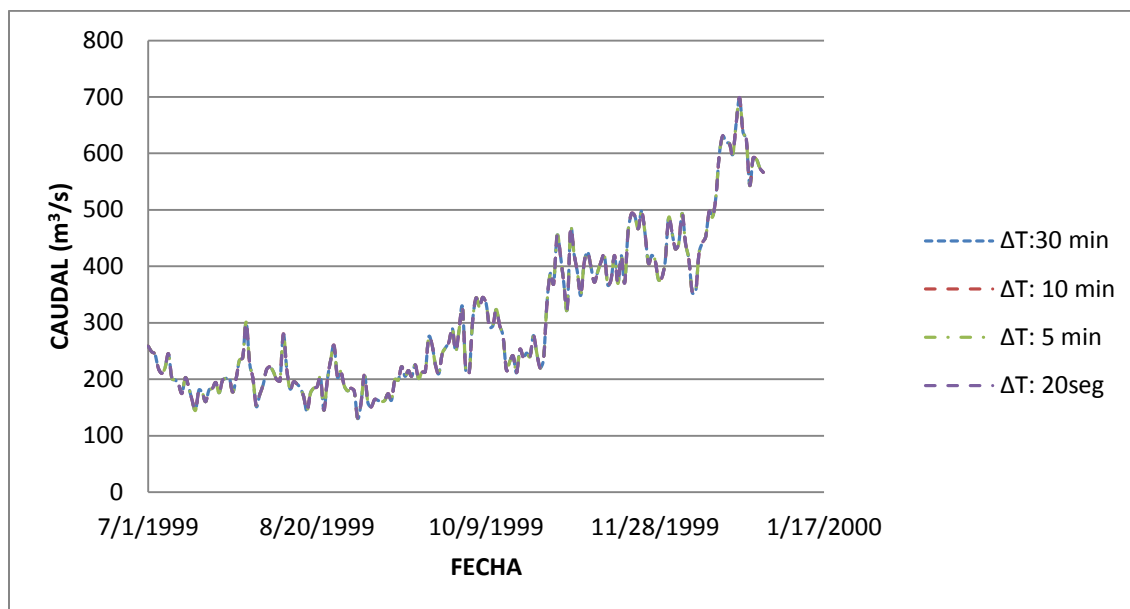


Figura C- 1. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Caudales Estación: **La Bolsa** -Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200\text{m}$)

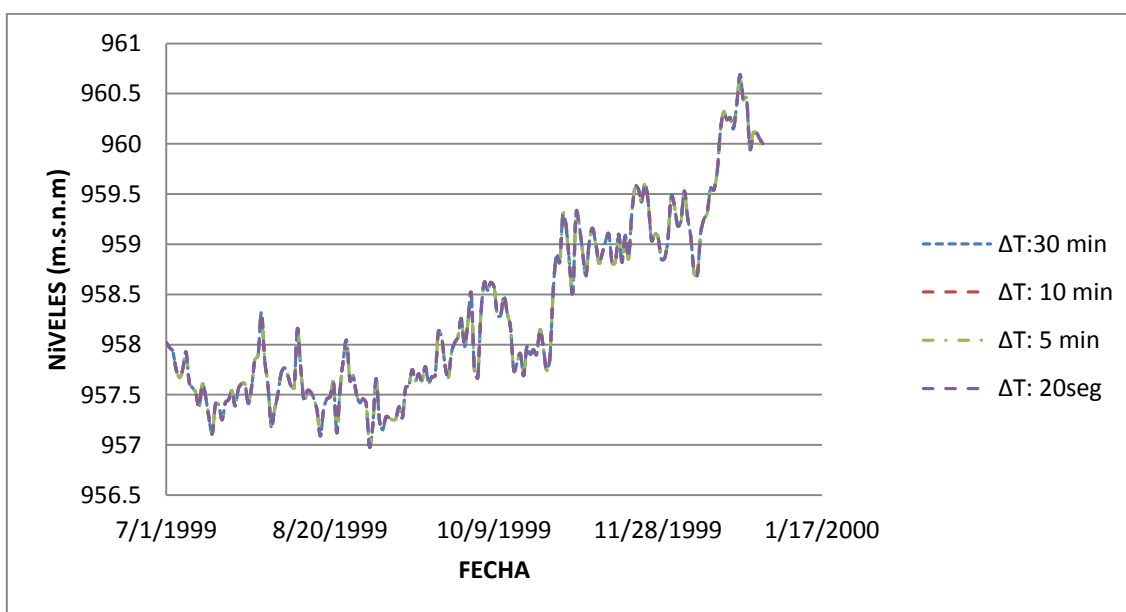


Figura C- 2. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Niveles Estación: **La Bolsa**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200\text{m}$)

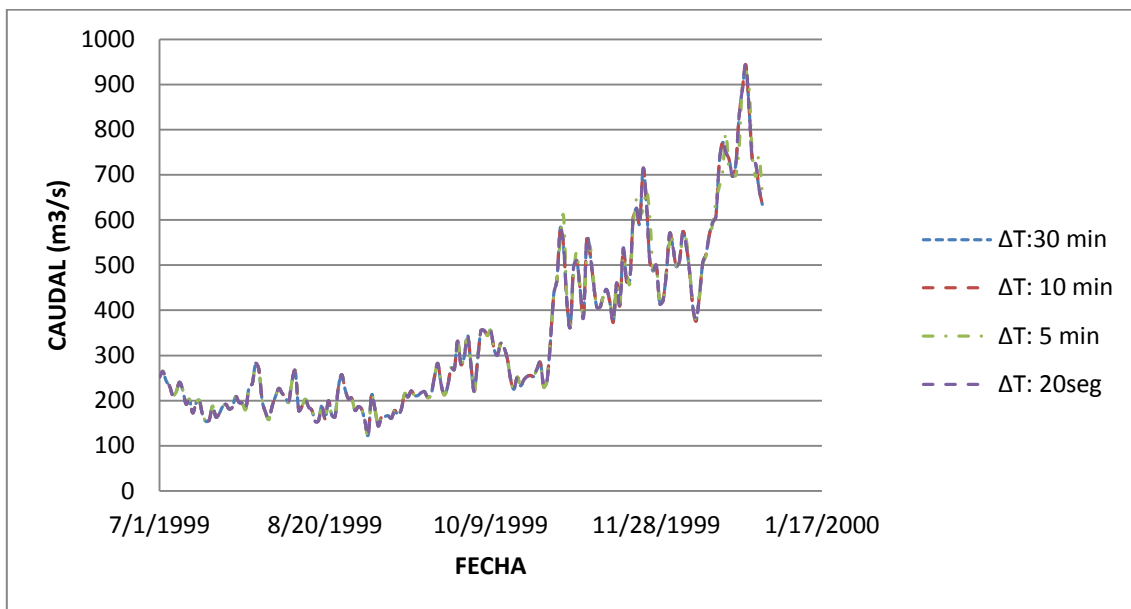


Figura C- 3. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Caudales Estación: **Hormiguero**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

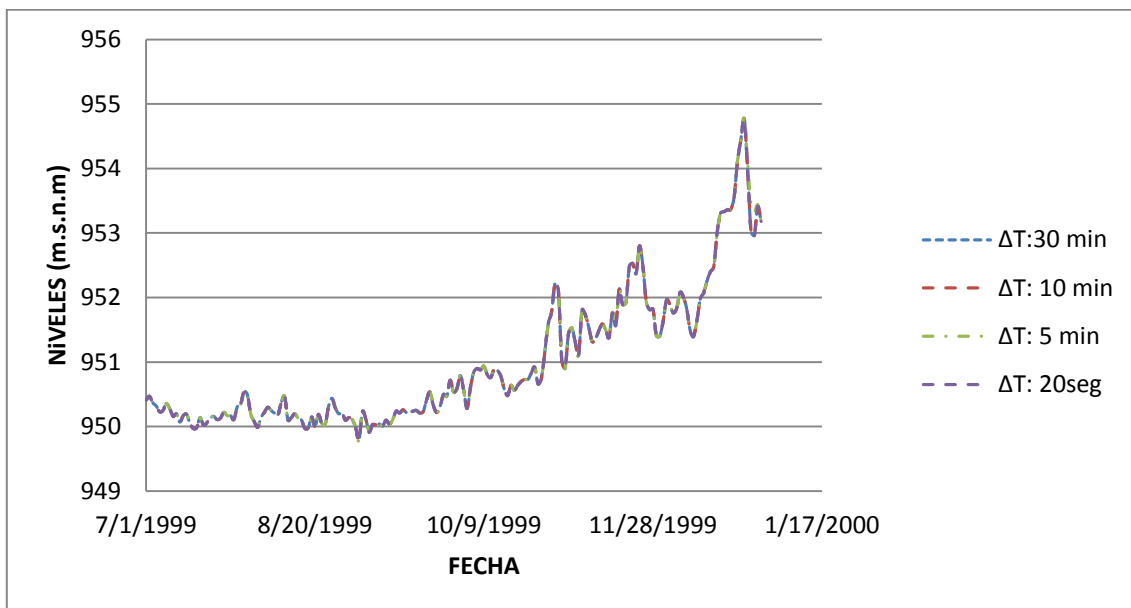


Figura C- 4. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Niveles Estación: **Hormiguero**-periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

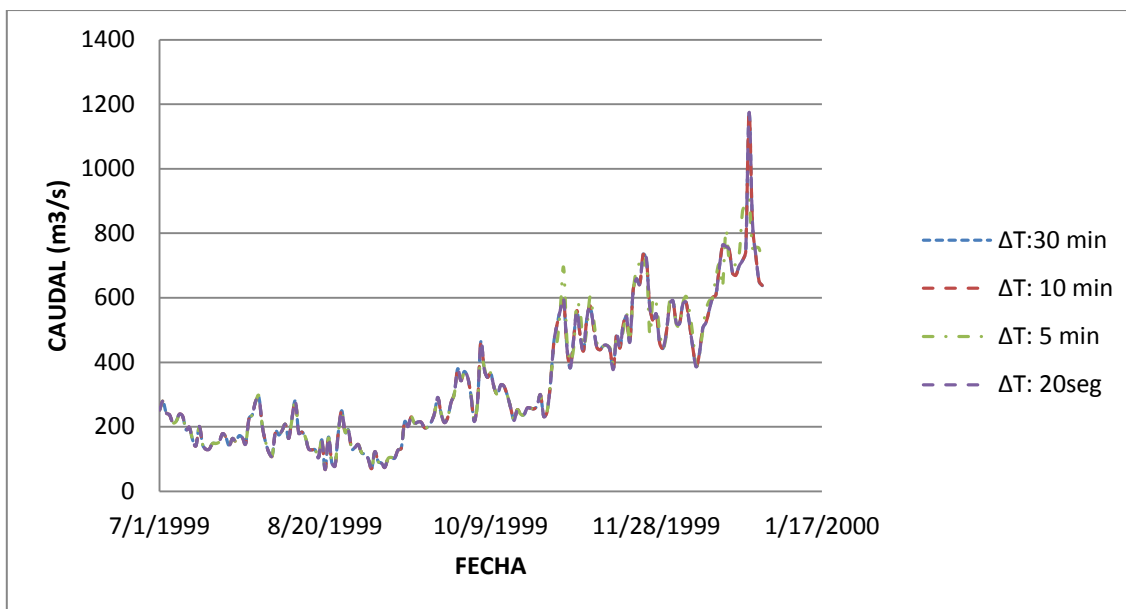


Figura C- 5. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Caudales Estación: **Juanchito**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

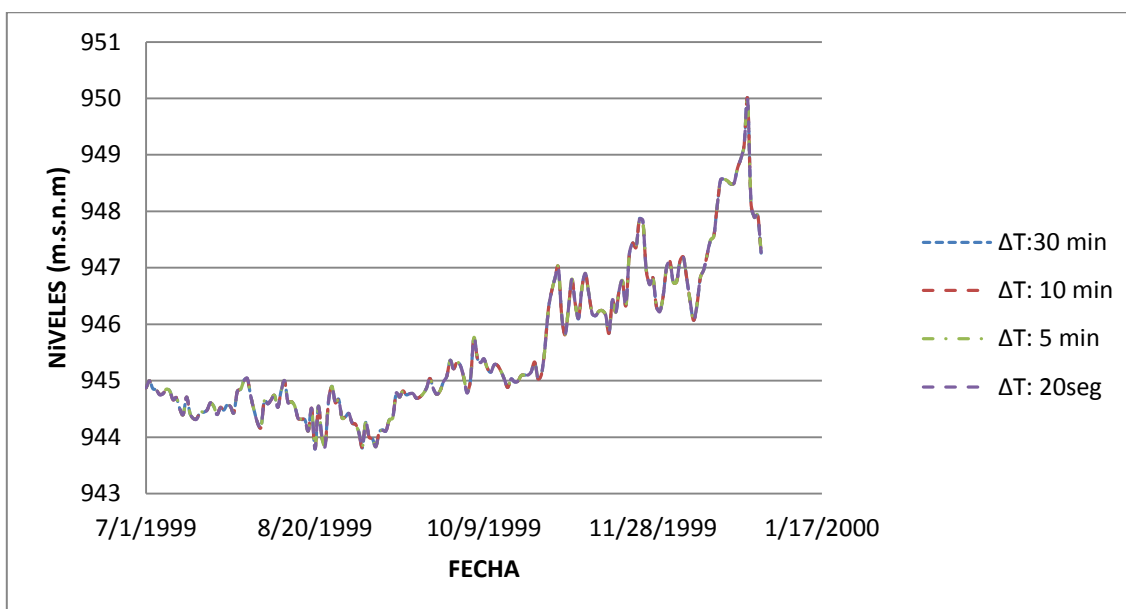


Figura C- 6. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Niveles Estación: **Juanchito**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

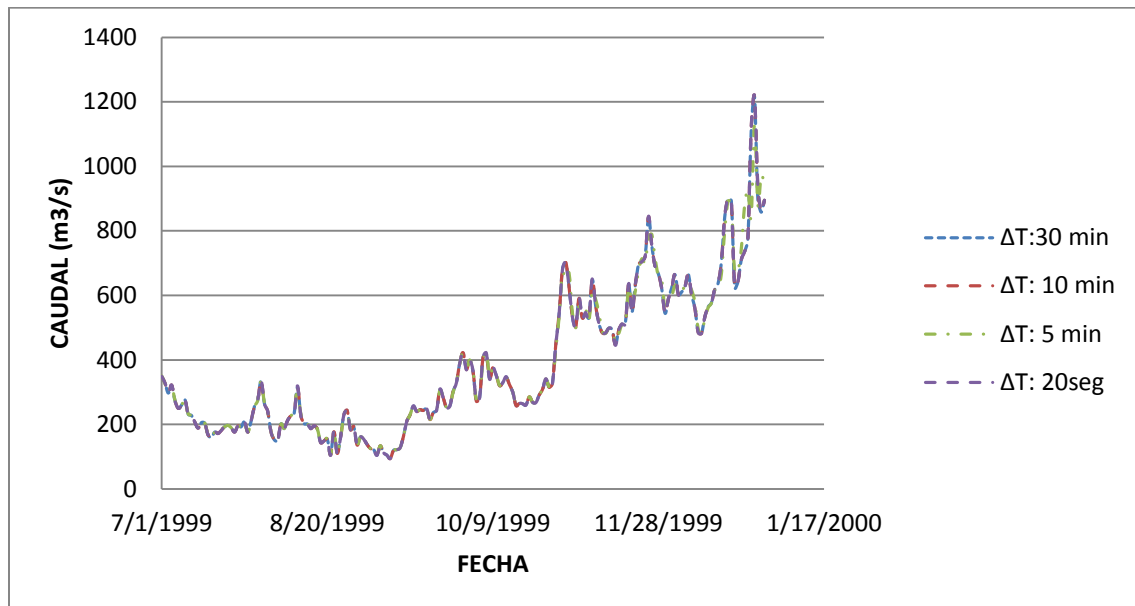


Figura C- 7. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Caudales Estación: **Mediacanoa**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)



Figura C- 8. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Niveles Estación: **Mediacanoa**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

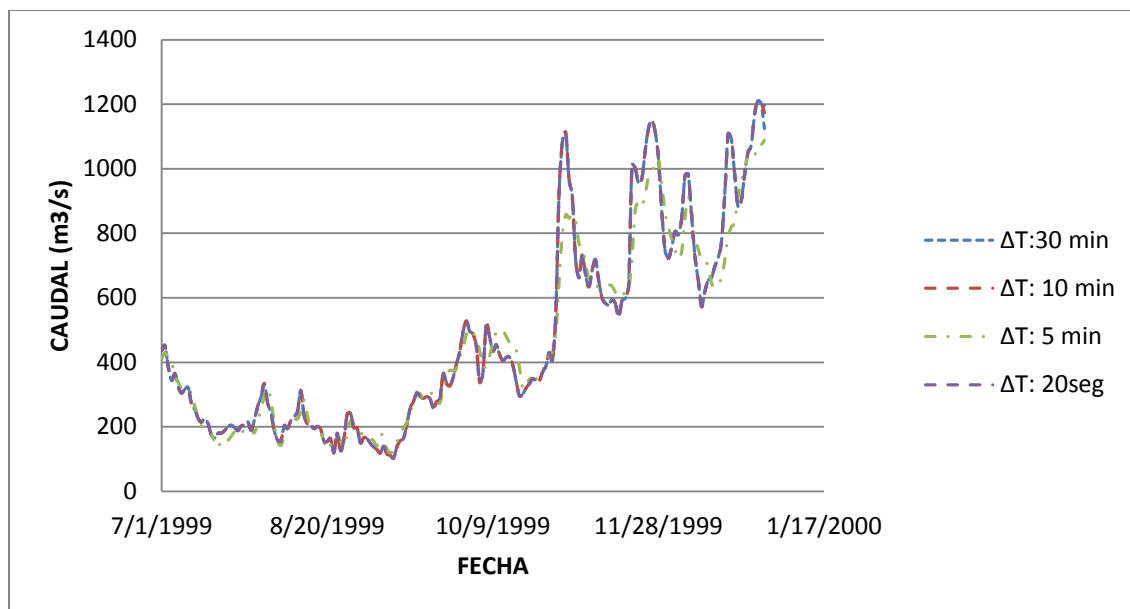


Figura C- 9. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Caudales Estación: **Güayabal**-periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

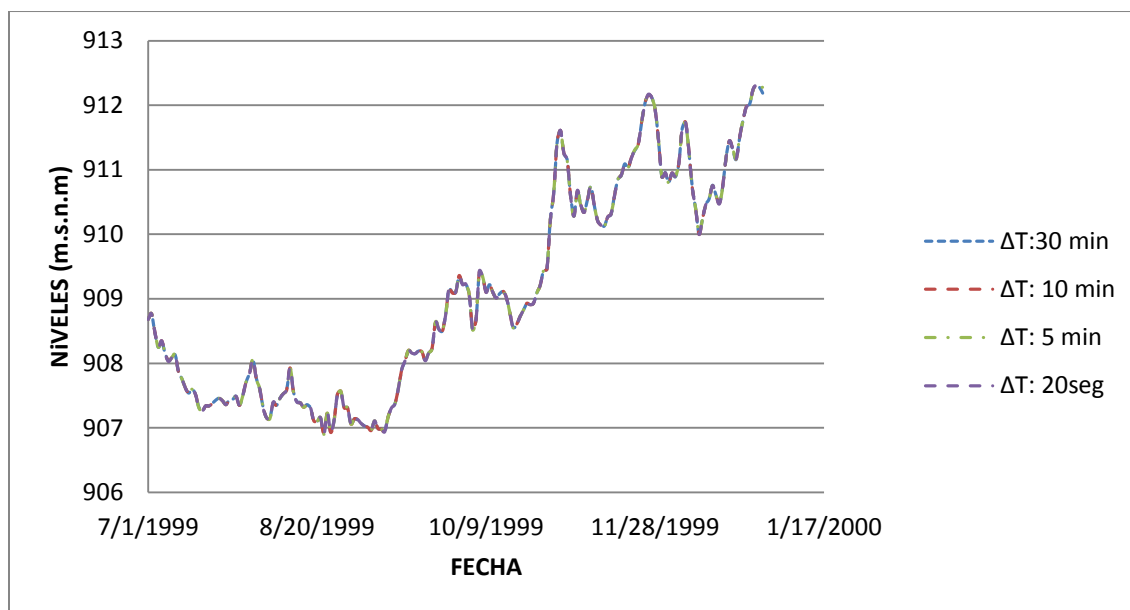


Figura C- 10. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Niveles Estación: **Güayabal**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

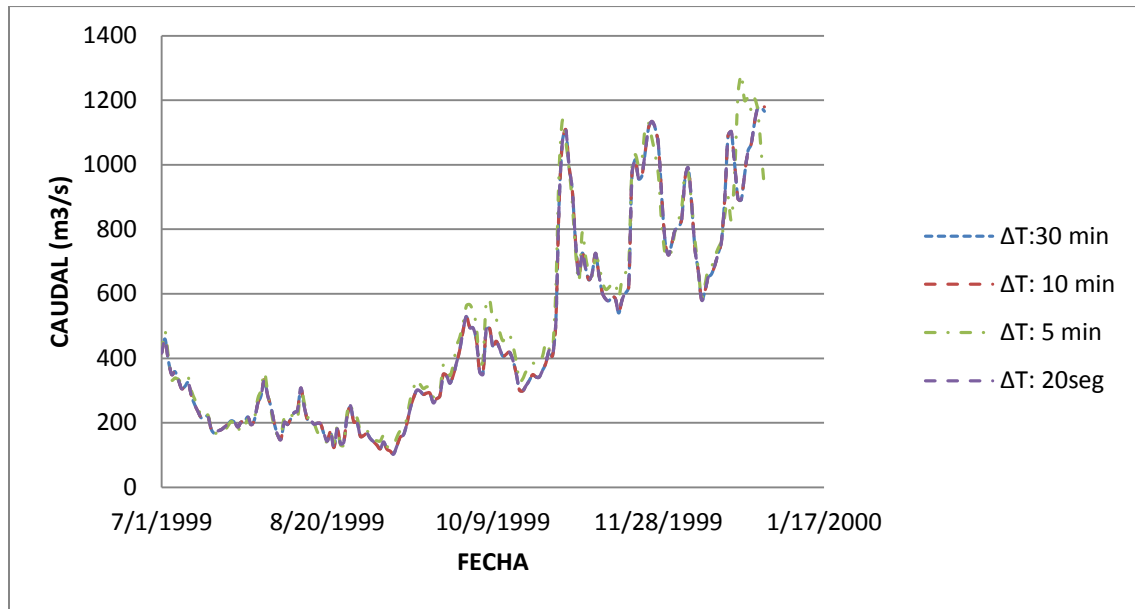


Figura C- 11. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Caudales Estación: La Victoria-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

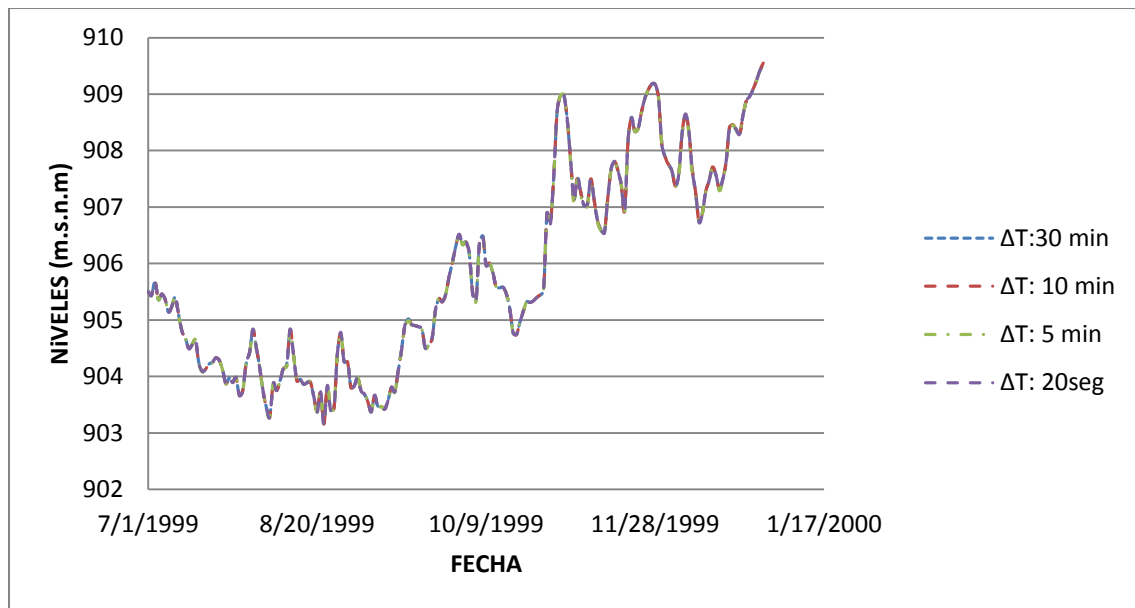


Figura C- 12. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Niveles Estación: La Victoria-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

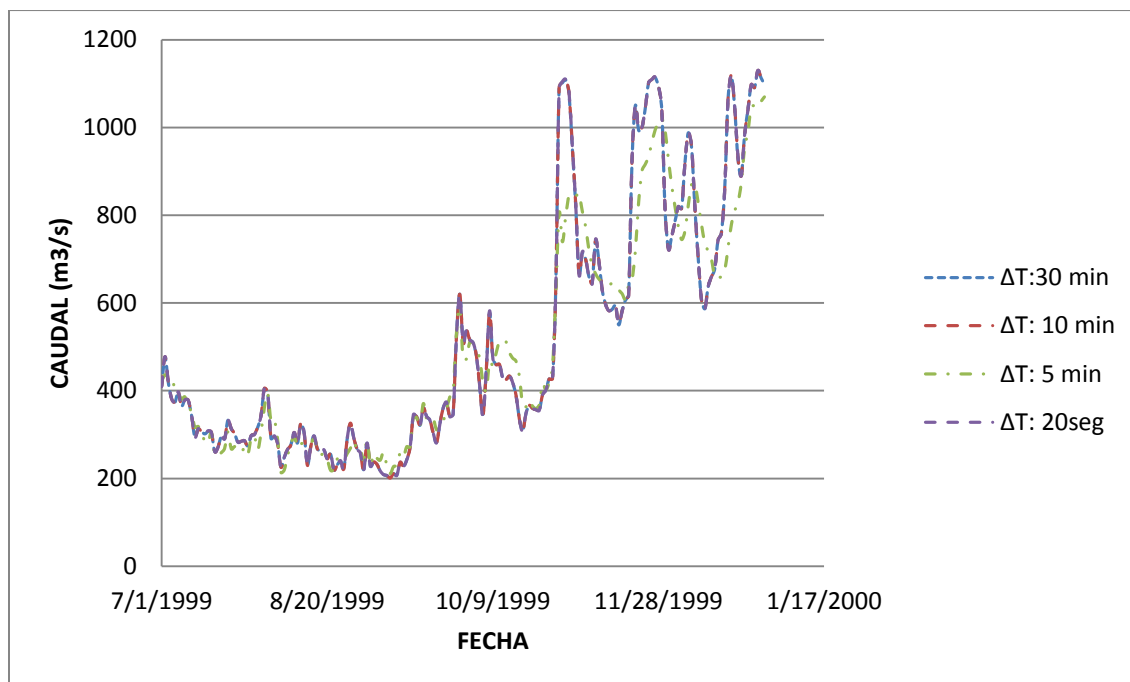


Figura C- 13. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Caudales Estación: **Anacaro**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

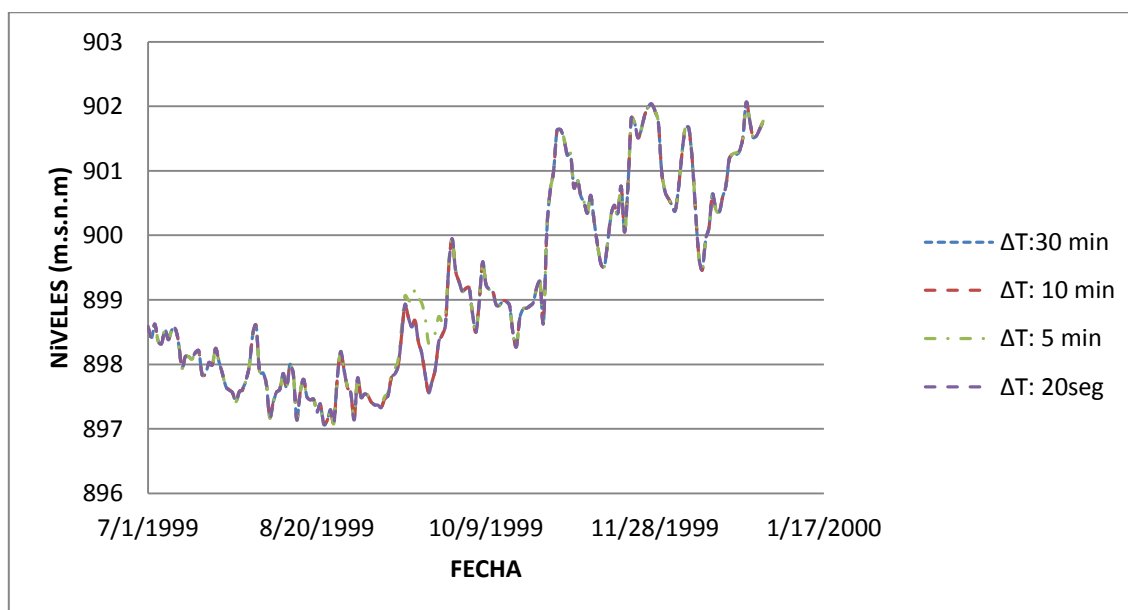


Figura C- 14. Influencia del intervalo de tiempo (Δt) en los Niveles Estación: **Anacaro**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

ANEXO D. Análisis de Sensibilidad: influencia de la rugosidad de manning entre secciones Δx_{max} en las estaciones hidrométricas del río Cauca

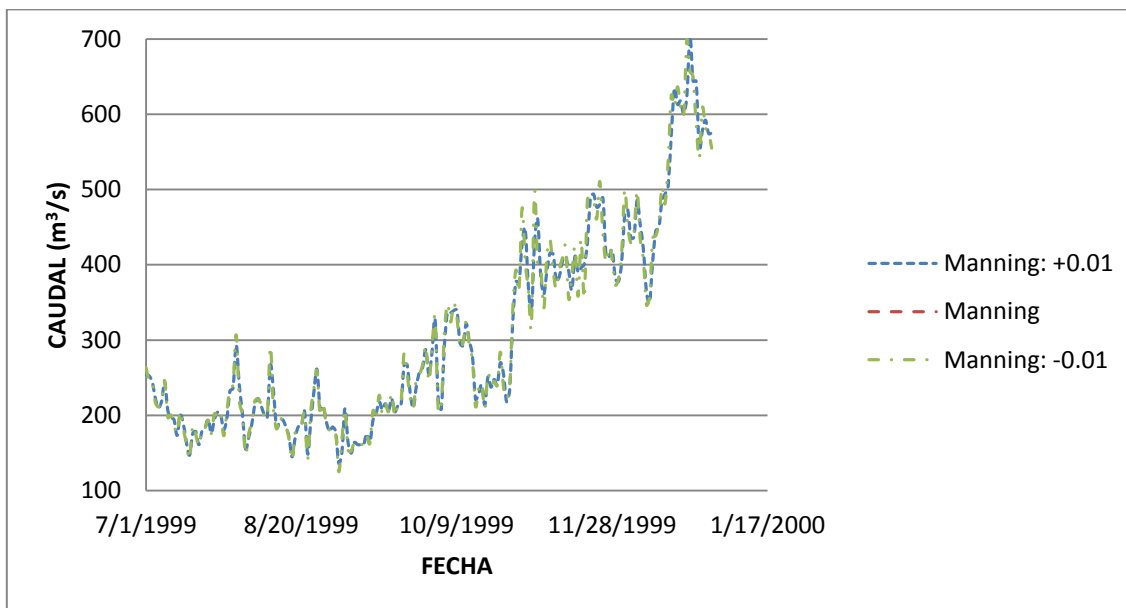


Figura D- 1. Influencia de la rugosidad de manning en los Caudales Estación: **La Bolsa**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

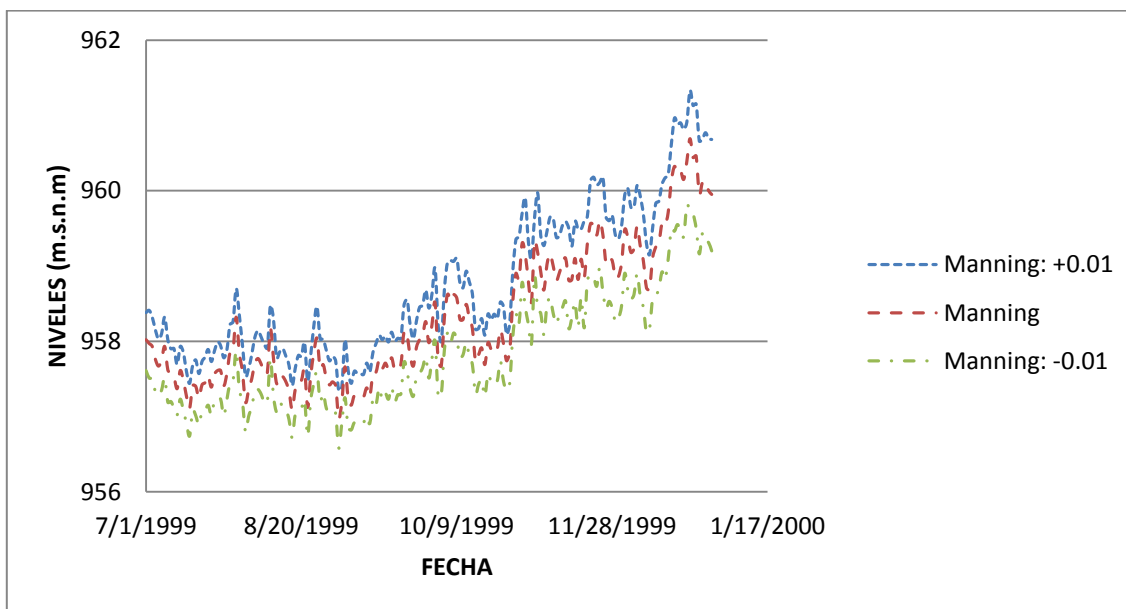


Figura D- 2. Influencia de la rugosidad de manning en los Niveles Estación: **La Bolsa**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

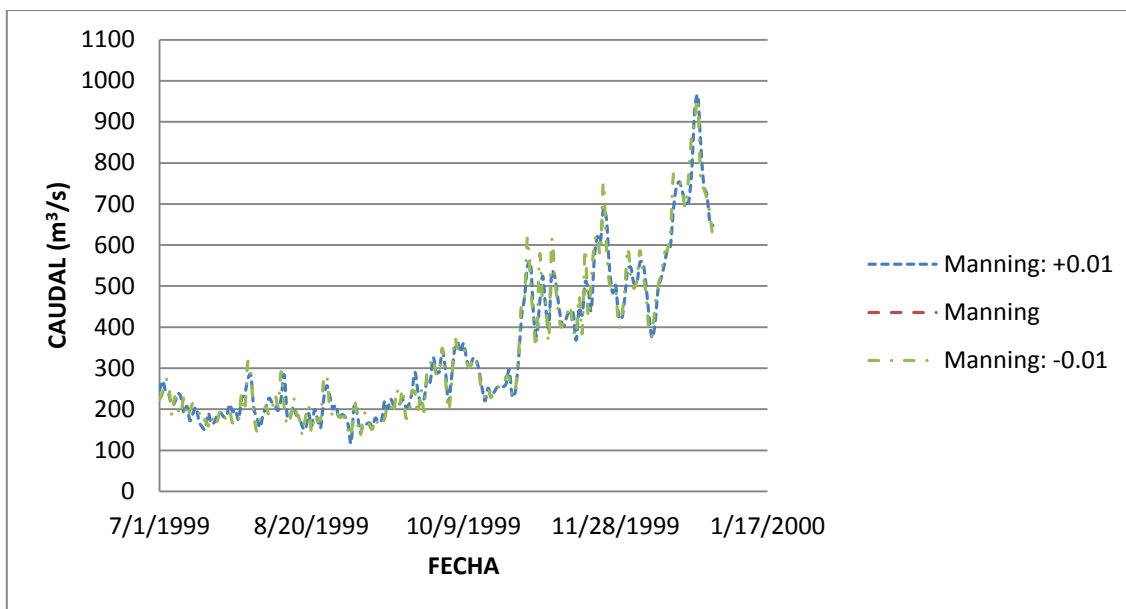


Figura D- 3. Influencia de la rugosidad de manning en los Caudales Estación: **Hormiguero**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

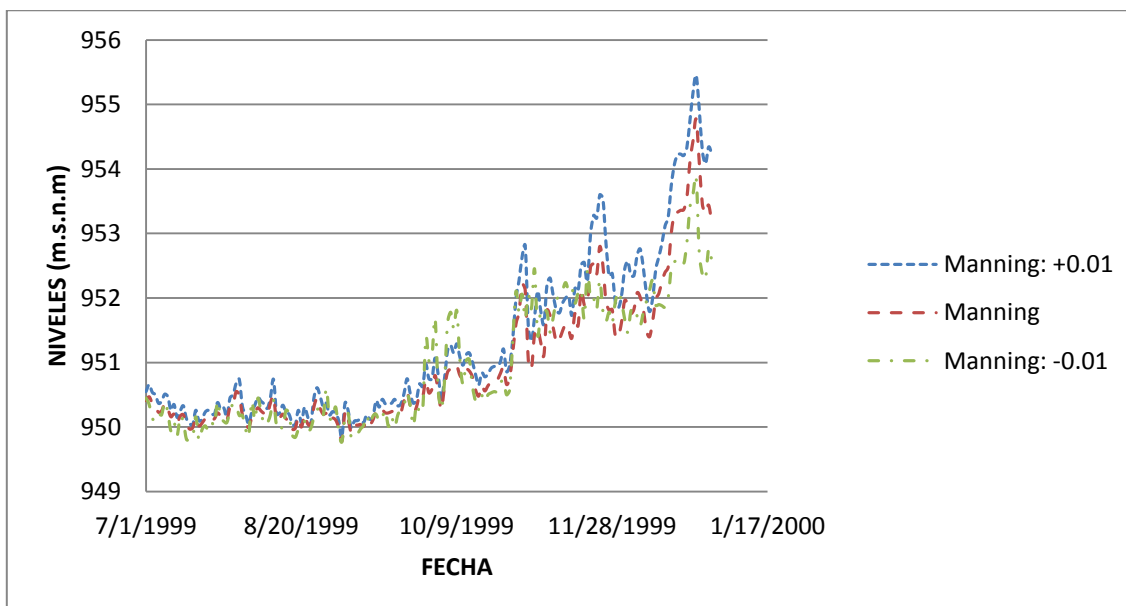


Figura D- 4. Influencia de la rugosidad de manning en los Niveles Estación: **Hormiguero**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

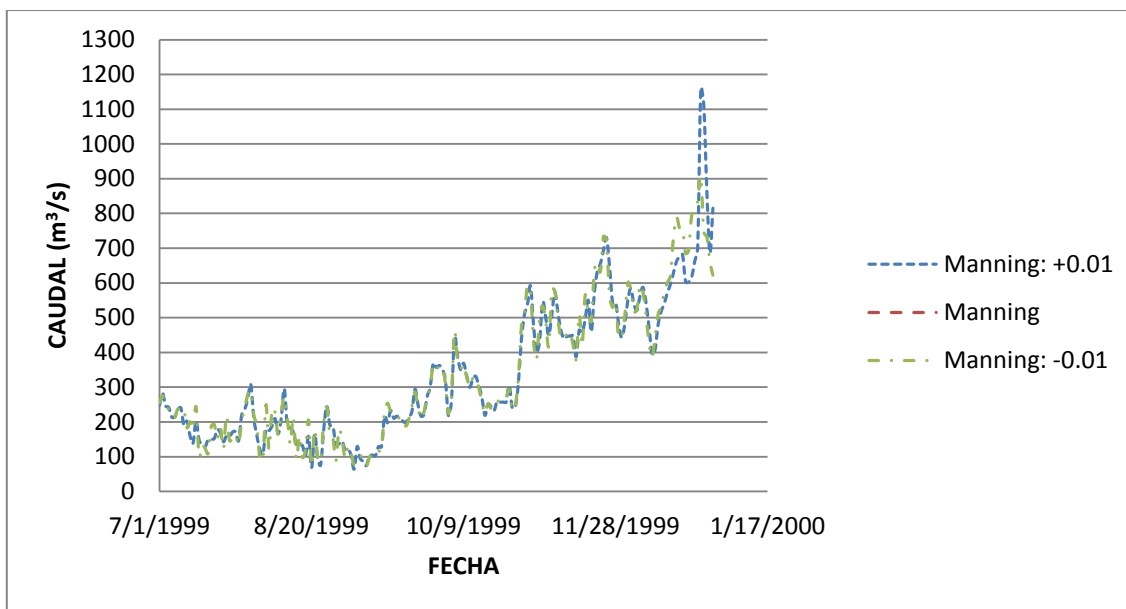


Figura D- 5. Influencia de la rugosidad de manning en los Caudales Estación: **Juanchito**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

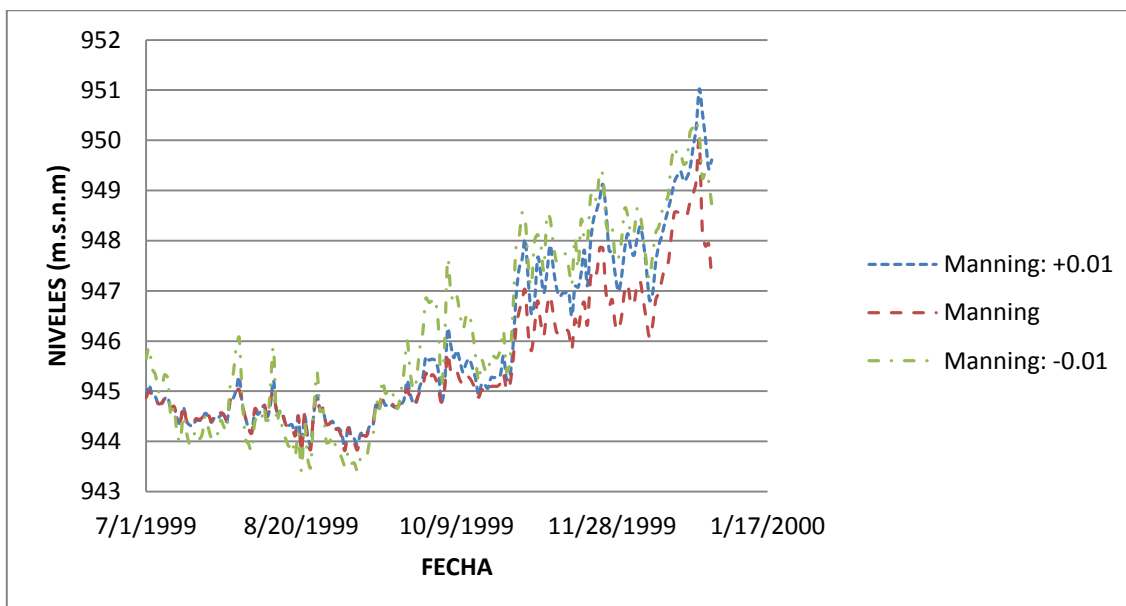


Figura D- 6. Influencia de la rugosidad de manning en los Niveles Estación: **Juanchito**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

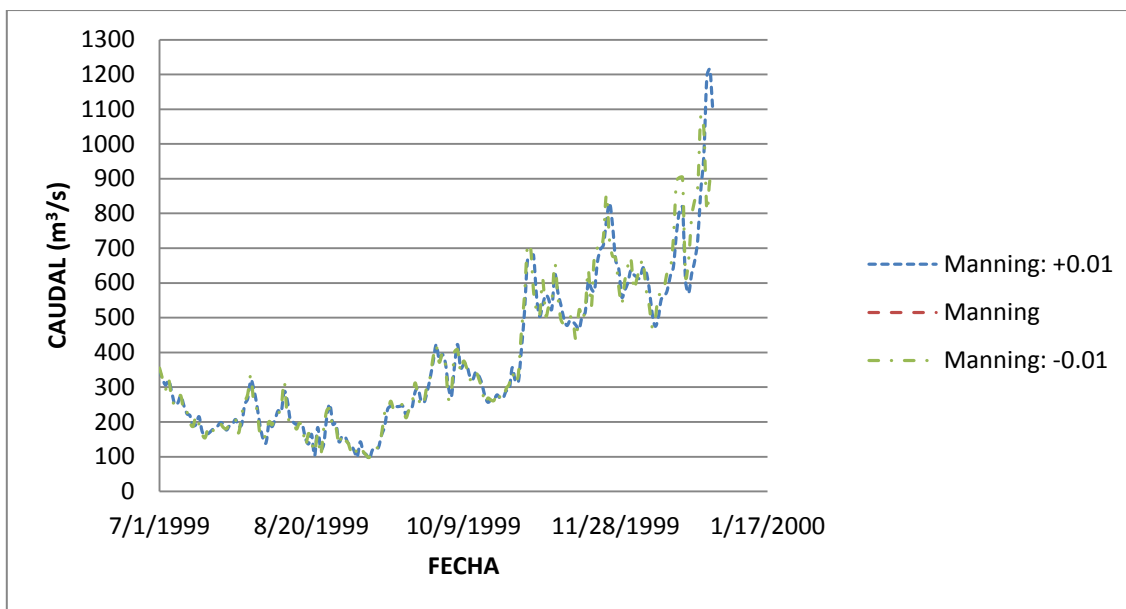


Figura D- 7. Influencia de la rugosidad de manning en los Caudales Estación: **Mediacanoa**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

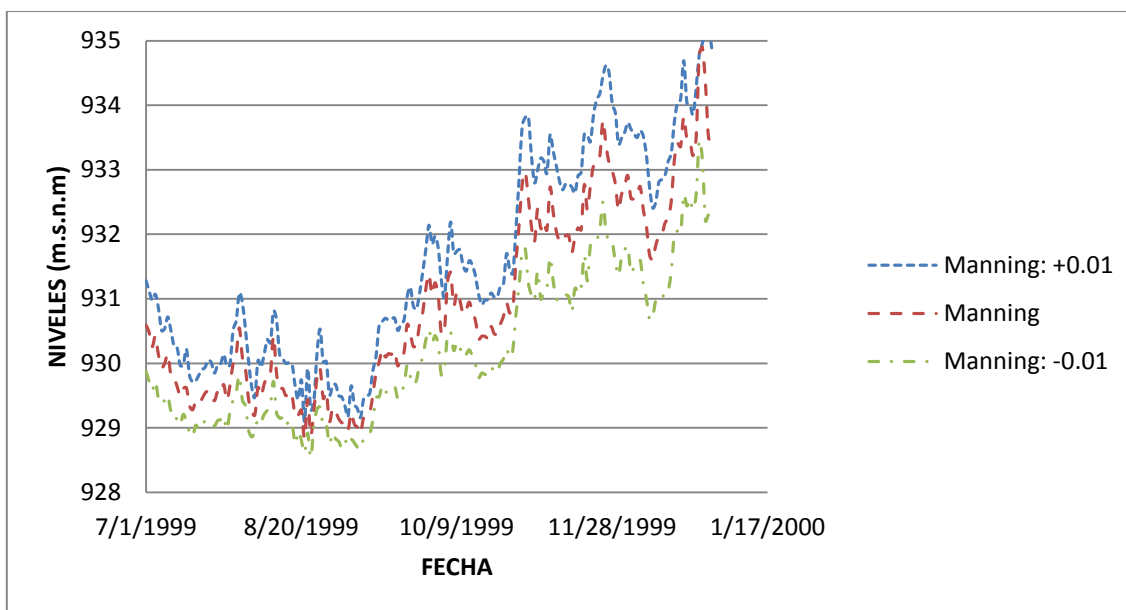


Figura D- 8. Influencia de la rugosidad de manning en los Niveles Estación: **Mediacanoa**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

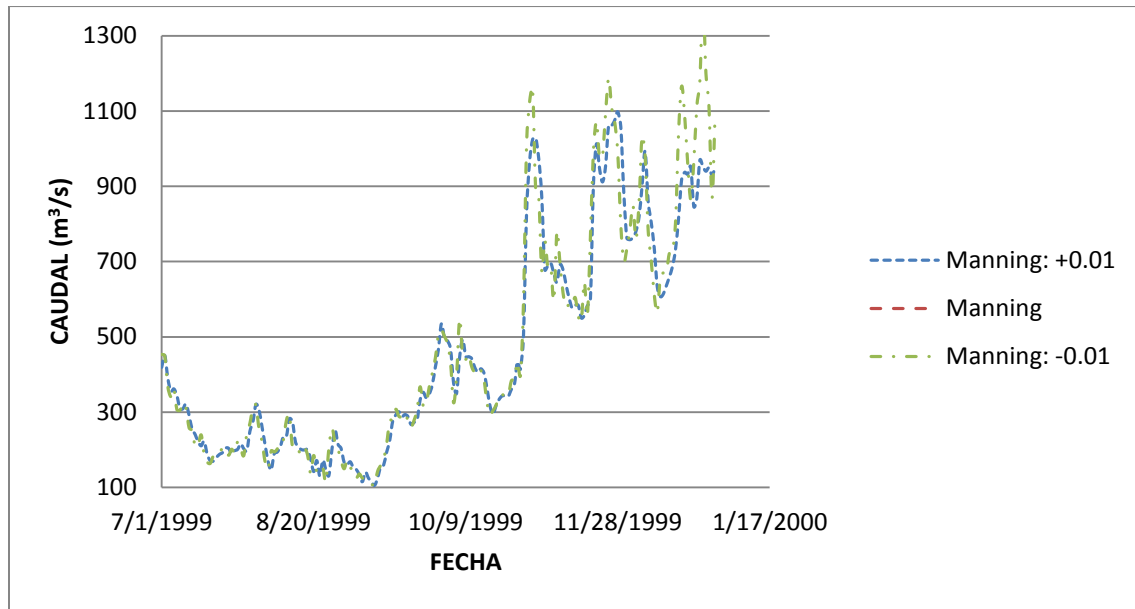


Figura D- 9. Influencia de la rugosidad de manning en los Caudales Estación: Güayabal-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

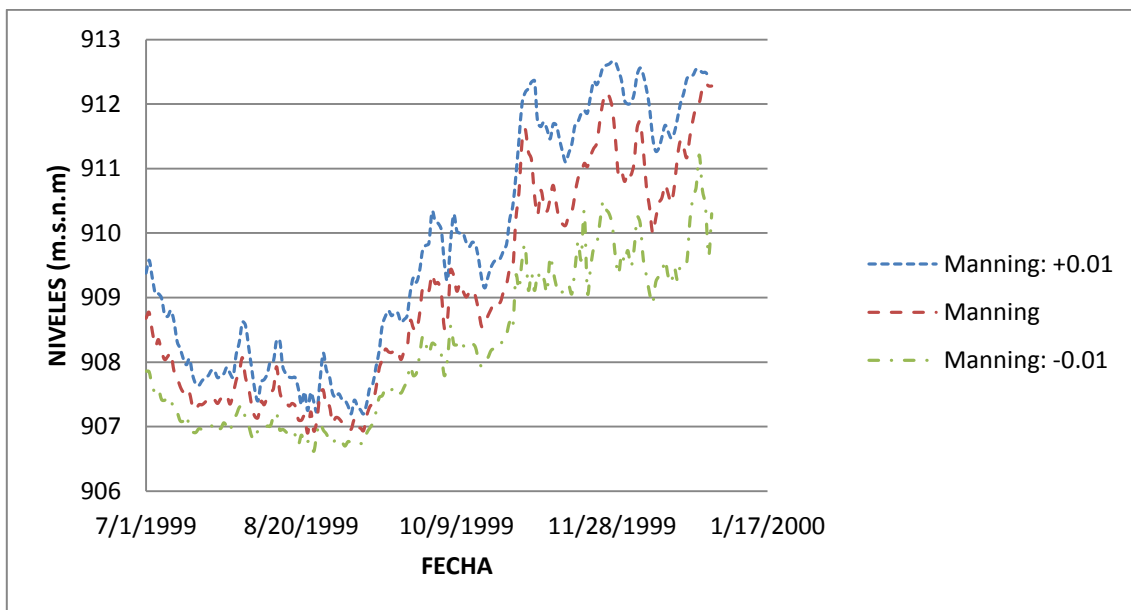


Figura D- 10. Influencia de la rugosidad de manning en los Niveles Estación: Güayabal-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

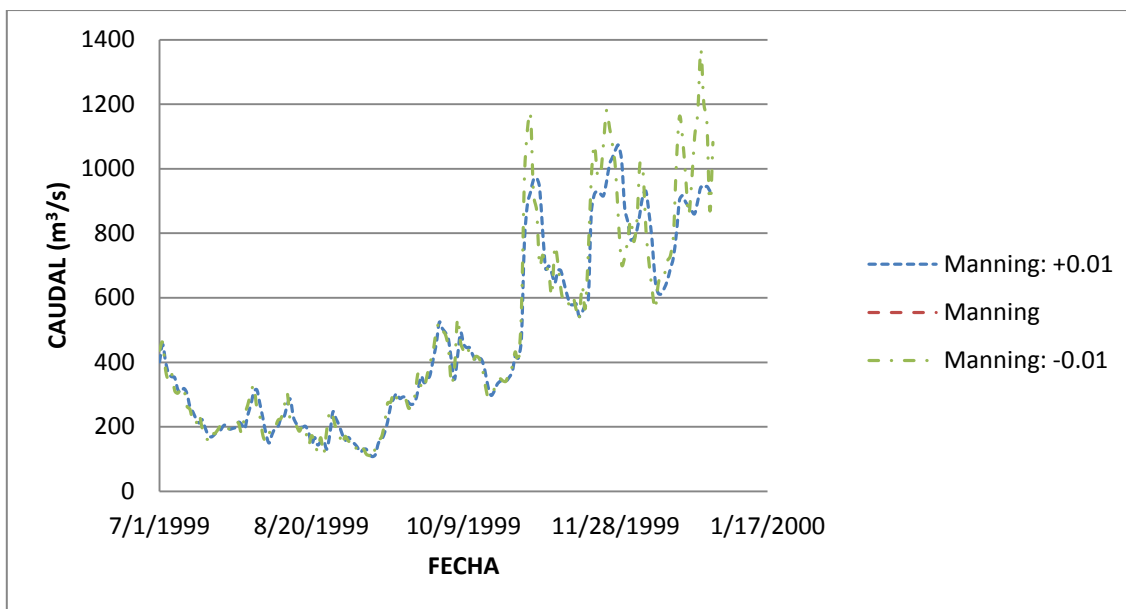


Figura D- 11. Influencia de la rugosidad de manning en los Caudales Estación: **La Victoria**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

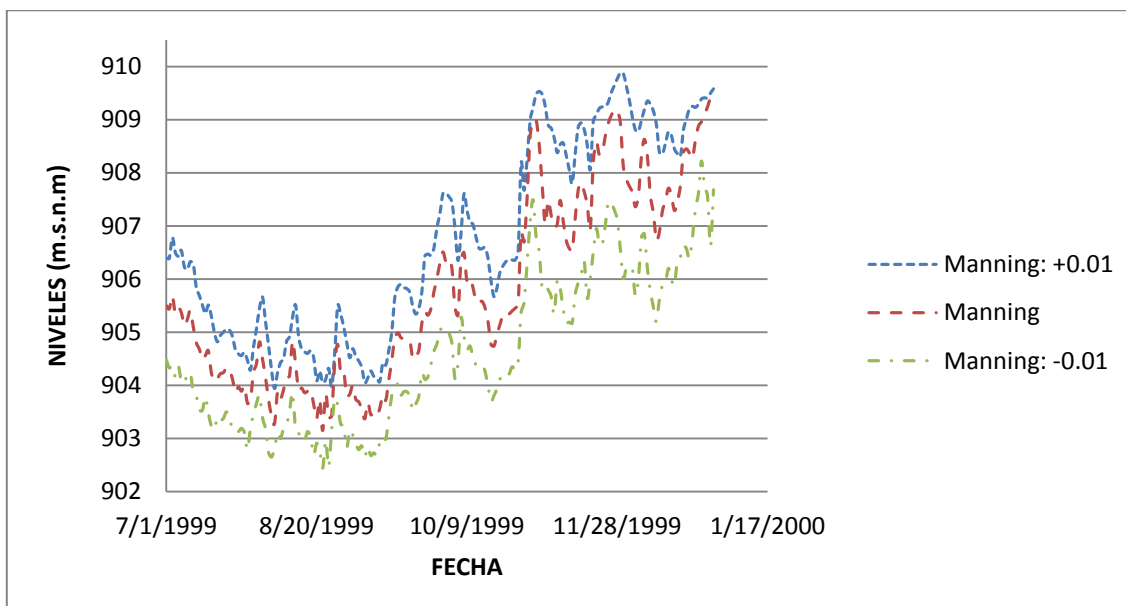


Figura D- 12. Influencia de la rugosidad de manning en los Niveles Estación: **La Victoria**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{\max}=200\text{m}$)

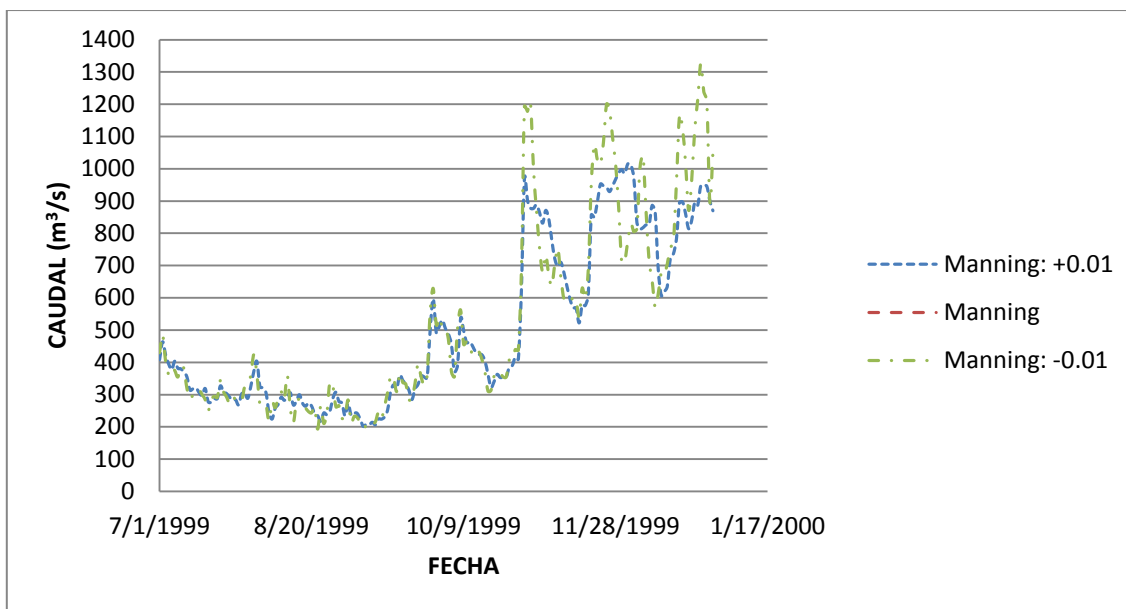


Figura D- 13. Influencia de la rugosidad de manning en los Caudales Estación: **Anacaro**-Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)

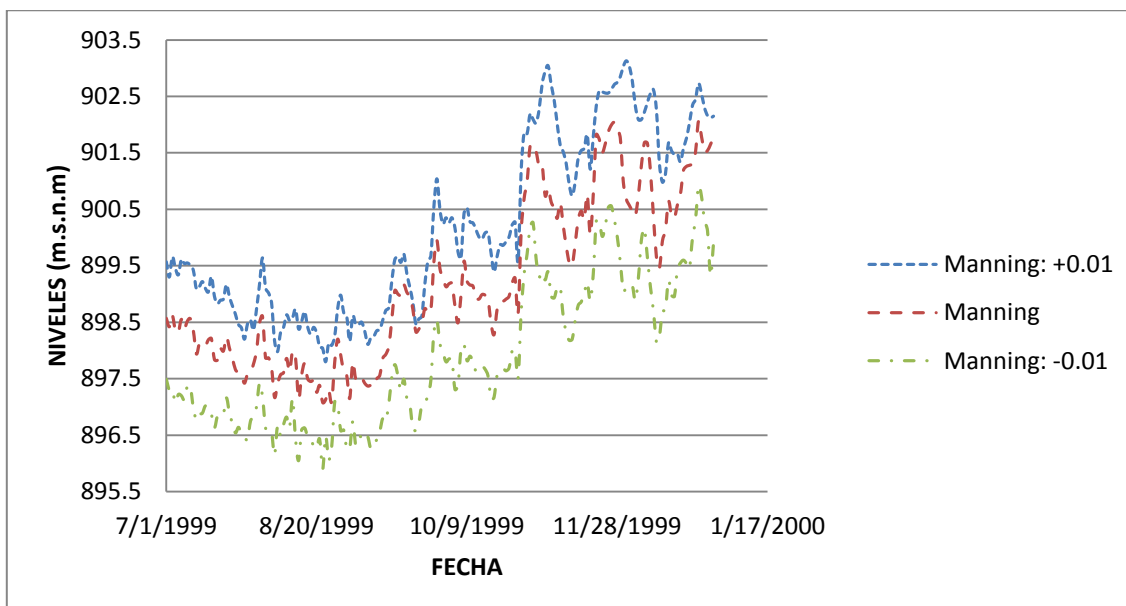


Figura D- 14. Influencia de la rugosidad de manning en los Niveles Estación: **Anacaro**- Periodo: Julio-Diciembre 1999 ($\Delta x_{max}=200m$)